

Бараночников М.Л.

Приемники инфракрасного излучения

Состояние разработок и промышленного выпуска,
перспективы развития и прогнозы

Аналитический обзор

В обзоре, составленном по материалам открытой советской и зарубежной печати сообщается о различных области:: применения изделий микрофотоэлектроники, приводятся сведения о составе продукции основных зарубежных фирм выпускающих фотонные и тепловые приемники ИК-излучения. Приводятся основные сведения о конструкциях фотоприемников и ФПУ, а также об уровне фотоэлектрических параметров основных типов фото- и тепловых приемников излучения выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, оценивается перспективы разработки и выпуска приемников излучения.

Обзор рассчитан на инженерно-технических работников, молодых специалистов и руководителей подразделений, занимающихся разработкой и эксплуатацией приемников ИК-излучения.

г. Москва, 1985 год

Введение

Известные преимущества инфракрасной техники по сравнению с оптическими (работающими в видимой части спектра), радиотехническими и радиолокационными системами привели в последнее десятилетие к резкому расширению применения ИК - систем и приборов в науке, технике, промышленности и в военном деле.

Современная инфракрасная техника обладает внушительным арсеналом разнообразных средств, отличающихся как областью применения, так и особенностями конструкции.

Напомним, что под инфракрасными приборами понимают устройства, предназначенные для генерирования инфракрасного излучения, а также для обнаружения и обработки сигналов информации от источника излучения.

Таковыми источниками могут быть любые объекты (цели) как собственным, так с искусственным излучением.

По способу использования излучения инфракрасные системы и приборы условно разделяются на два основных типа активные (полуактивные) и пассивные. Структурные схемы ИК-систем приведены на рис. 1.

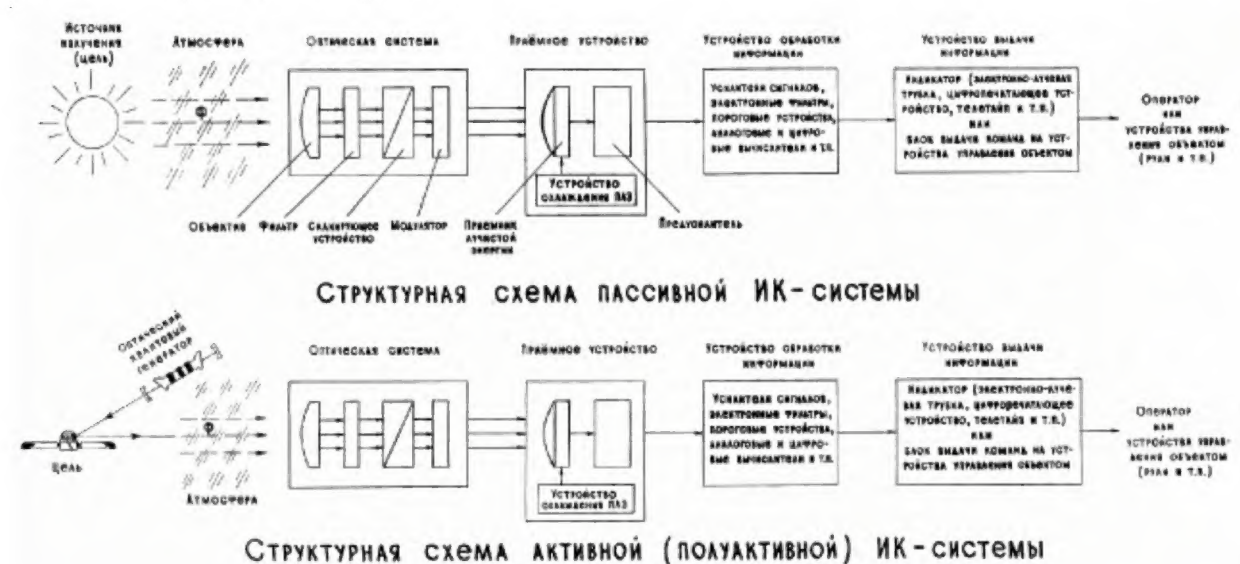


Рис. 1. Структурные схемы ИК-систем.

В приборах активного типа исследуемый или наблюдаемый объект облучается источником инфракрасного излучения, параметрам которого может управлять оператор. Такие приборы по принципу действия аналогичны радиолокационным устройствам.

В приборах пассивного типа используется собственное или отраженное от естественных источников излучение наблюдаемого объекта.

По назначению приборы инфракрасной техники разделяют на следующие основные виды: пирометры, радиометры; приборы, дающие изображение (тепловизоры, системы связи, анализаторы и источники инфракрасного излучения; поисковые приборы и следящие системы.

К приборам пассивного типа относятся, например, многоканальные сканеры, используемые для исследования природных ресурсов земли; медицинские термографы и тепловизоры, применяемые для выявления температурных аномалий на поверхности человеческого тела и ранней диагностики целого ряда заболеваний; ИК-дефектоскопы для обнаружения повреждений электронной техники; радиометры для дистанционного измерения температуры нагретых и холодных тел; различные приборы и устройства, используемые в вычислительной технике, связи, пожарном деле, криминалистике, градостроении, автоматическом управлении технологическими процессами, охранных устройствах и т.п.

Инфракрасные системы активного и полуактивного типов широко используются для контроля процессов при обработке сверхтвердых материалов лазерным лучом; при проведении операций «без ножа» в медицине; в системах сверхдальней оптической связи и дальнометрии; при управлении объектами по лазерному лучу; в системах записи и обработки голографической информации и т.п.

Развитие космической техники и освоение космического пространства привели к новому этапу развития и совершенствования инфракрасной техники и приборов. Последнее было вызвано ещё и тем, что в космосе существуют почти идеальные условия распространения инфракрасного излучения - отсутствие поглощающей и рассеивающей сред и сравнительно однородный фон.

Поиск, обнаружение и опознавание теплоизлучающих и теплоотражающих объектов в космосе и из космоса; космическая оптическая связь и наведение космических аппаратов; исследование природных ресурсов Земли; метеорологическая разведка; спектральный анализ атмосферы планет и многие другие задачи решает сегодня инфракрасная техника в космическом пространстве.

Однако, ведущее место среди многочисленных применений ИК-техники, занимают её военные применения.

Инфракрасные системы широко используются в настоящее время для обнаружения и слежения за наземными, надводными и подводными целями; они используются в приборах ночного видения и тепловой разведки местности; в системах переднего обзора летательных аппаратов и боевых машин пехоты; в миноискателях и лазерных дальномерах; в системах управления оружием и боеприпасами; в системах секретной связи и оптико-электронного противодействия и др. военной технике.

В настоящее время трудно представить себе отрасль науки и техники в которых бы не применялись инфракрасные системы и приборы. Специфические особенности инфракрасного излучения, как носителя информации, ставят его в один ряд с оптическим (видимая часть спектра) и радиоизлучением.

Поскольку, тепловое излучение тел непосредственно связано с их энергетическим состоянием, оно содержит в себе сведения о температуре источника и его излучающих свойствах. При этом спектральный состав излучения кроме температуры, зависит и от материала и состояния поверхности источника излучения. Это качество и огромная информационная способность ИК-излучения, как носителя информации, позволяют выявлять внутренние свойства объектов излучения, наблюдать глубинные процессы, протекающие, в них; именно они способствуют привлечению ИК-техники для решения таких задач, в которых получить указанную информацию с помощью других методов не удастся. Это, собственно говоря, и определяет тот огромный интерес, который проявляется к инфракрасной технике при разработке перспективной оптико- и радиоэлектронной аппаратуры различного целевого назначения.

Сегодня производство инфракрасной техники, приборов и систем в развитых странах достигло огромных размеров и превратилось в самостоятельные отрасли промышленности. Судя по материалам зарубежной печати объём затрат на создание и выпуск ИК-приборов только военного назначения в странах НАТО исчисляется миллиардами долларов в год. Сотни электронных, космических, машиностроительных, авиационных, химических и др. концернов и фирм работают в этом направлении [1, 22, 2, 3, 4, 34].

Работа любого вида аппаратуры, использующей инфракрасное излучение основана на регистрации этого излучения специальным приемником, являющимся обязательным и основным элементом оптико-электронных приборов и др. ИК-систем.

Этот приемник, по-существу, является преобразователем энергии излучения в какую-либо другую, удобную для регистрации форму, например, в электрический ток, изменение проводимости или емкости, или иных свойств приемника. Например, почернение фотографической эмульсии и т.п.

Приемники излучения условно разделяются на две группы: «дающие» изображение и точечные приемники.

Приемники излучения, преобразующее невидимое глазом инфракрасное излучение в видимое - называются преобразователями изображения.

Подобная классификация удобна при рассмотрении систем приема изображения. Например, такой приемник (преобразователь) изображения, как фото-пленка, непосредственно передает полное изображение кадра, а при использовании одноэлементного приемника для создания изображения необходим поэлементный обзор кадра и последовательная развертка картины. Одно-элементный точечный приемник излучения, помещенный в плоскости изображения, реагирует на среднюю облученность изображения в пределах участка, занимаемого чувствительной поверхностью приемника.

Приемник, воспроизводящий изображение, может быть представлен состоящим из очень большого числа точечных приемников, каждый из которых реагирует на излучение отдельной точки изображения.

Таким образом, основное различие между этими двумя группами приемников состоит во времени, требуемом для наблюдения (воспроизведения) картины теплового поля.

Приемники изображения (преобразователи) воспринимают все изображение в целом, а точечные последовательного точкам. Заметим, что один и тот же приемник может относиться и к той, и к другой группам. Так точечные приемники, сгруппированные в двумерную мозаику и матрицу, образуют приемник изображения.

Приемник излучения является важнейшим элементом любой ИК-системы, устройства или прибора. Именно приемник излучения, в подавляющем большинстве случаев, определяет такие основные параметры ИК-систем, как дальность действия, чувствительность, спектральную область применения, помехоустойчивость, разрешающую способность, динамический диапазон аппаратуры и др. характеристики.

По принципу приемники и преобразователи ИК-излучения условно разделяются на три основные группы: тепловые, фотохимические и фотонные.

Тепловые приемники и преобразователи излучения являются неселективными приборами, т.е. они имеют одинаковую спектральную характеристику в широком диапазоне электромагнитного спектра (до сотен микрометров). Работа тепловых приемников излучения основана на преобразовании энергии излучения сначала в тепловую, а затем в электрическую. К тепловым приемникам относятся: термоэлементы, терморезисторы, болометры, пироэлектрические приемники и т.п.

К фотохимическим преобразователям излучения относятся приемники, изменяющие свои химические свойства под действием излучения. Это фотопластины, фотопленки, фотобумаги и т.п. Эти преобразователи относятся к селективному типу приемников «обладающих чувствительностью только на определенном участке спектра излучения»

Основную, по широте использования, группу составляют, так называемые фотонные или квантовые приемники излучения. В приемниках этого типа фотоны излучения взаимодействуют с электронами материала, из которого изготовлен чувствительный элемент приемника. Чувствительность фотонного приемника пропорциональна числу поглощенных фотонов. Такой приемник селективен, т.е. он реагирует только на кванты излучения с определенной частотой (длиной волны).

В свою очередь, фотонные приемники излучения подразделяются на приемники с внешним фотоэффектом (фотоэлементы, фотоумножители, электронно-оптические преобразователи и т.п.) и приемники с внутренним фотоэффектом - (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и т.п.)

В современных инфракрасных системах наиболее широкое распространение получили приемники излучения с внутренним фотоэффектом. Эти приемники получили название **фотоприемников** или фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения (ФЭПП).

В приемниках с внутренним фотоэффектом используются три основных физических явления, вызываемых действием излучения на полупроводник: явление фотопроводимости, фотогальванический и фотоэлектрический эффекты .

В общем случае, простейший фотоприемник представляет собой бескорпусной фоточувствительный элемент (ФЧЭ), или ФЧЭ, размещенный в герметичном защитном корпусе, имеющем входное окно из материала прозрачного для излучения.

В качестве фоточувствительного элемента, в большинстве случаев, используются фоторезисторные, фотодиодные, фототранзисторные, и фототиристорные структуры, изготовленные из полупроводникового материала, чувствительного к излучению в рабочей (для данного прибора) области спектра.

Рабочую область спектра выбирают из так называемых «атмосферных окон», т.е. из тех участков спектра, в которых поглощение излучения атмосферой минимально, а излучение от цели максимально (Рис.2а и Рис.2б).

До недавнего времени многие прикладные задачи решались с помощью простейших одноэлементных приемников излучения. Однако, в ряде случаев (например, при создании оптико-электронных систем, осуществляющих обзор пространства предметов) это приводило к увеличению габаритов, массы и энергопотребления аппаратуры и ограничению важнейших её технико-характеристик чувствительности, скорости обработки информации и др.).

Современное развитие приемников оптического излучения характеризуется не только дальнейшим улучшением параметров и характеристик простейших одноэлементных приемников излучения: чувствительности, быстродействия, области спектральной чувствительности, показателей надежности и т.п., но и поиском новых принципов их конструирования. Наиболее важным из них следует считать функциональное усложнение приемников излучения и создание многоэлементных матричных и линейных фоточувствительных структур со схемами обработки фотосигнала.

Внутреннее сопротивление фоточувствительных (теплочувствительных) элементов приемников излучения на основе большинства известных полупроводников и сегнетодиэлектриков может быть или очень низким (менее 10 Ом), или достаточно высоким (от сотен килоом до 10^{10} Ом). Как крайне, низкое, так и очень высокое сопротивление чувствительного элемента приемника излучения создает значительные трудности в практической реализации порога чувствительности (обнаружительной способности) фоточувствительного элемента в оптико-электронной аппаратуре. Чувствительность приемника излучения в аппаратуре во многом зависит от правильного выбора его режима работы и степени согласования с последующими элементами электронного тракта аппаратуры. Наличие «открытого» входа электронного тракта, протяженных электрических соединений приемника излучения со схемой усиления сигнала, не оптимальным образом выбранный температурный и электрический режимы работы и неоптимальное согласование с нагрузкой часто не позволяют реализовать потенциально высокие параметры чувствительного элемента.

В связи с этим в последнее время стали все реже встречаться разработки приемников излучения, состоящих только из одного чувствительного элемента, осуществляющего преобразование оптического излучения в электрический сигнал. Сейчас на приемники излучения стали возлагать функции, которые ранее выполнялись соответствующими элементами оптико-электронной аппаратуры. Совмещение нескольких выполняемых функций в одном изделии, имеющем, как правило, единую конструкцию, позволяет получить выигрыш не только в реализуемой чувствительности приемника излучения в аппаратуре, но и в габаритах и энергопотреблении оптико-электронной аппаратуры.

Приемники излучения, в которых на основе схемотехнических и конструктивных решений осуществляется ряд последовательных преобразований принимаемого сигнала, получили название фотоприемных устройств (ФПУ) в случае применения в качестве чувствительного элемента фотоэлектрического приемника, или тепловых приемных устройств (ТПУ) - в случае применения в качестве чувствительного элемента теплового приемника излучения. В ФПУ и ТПУ в общем случае могут выполняться следующие преобразования: селекция и усиление (с помощью иммерсионной оптики) преобразование оптического излучения в изменение проводимости полупроводника (или поляризации пироэлектрика), предварительное усиление электрического сигнала, простейшая обработка сигнала (фильтрация, формирование заданной полосы пропускания, запоминание и др.). В схемах некоторых ФПУ (ТПУ) могут содержаться такие элементы которые, кроме перечисленных выше функций, осуществляют охлаждение или термостабилизацию чувствительного элемента, стабилизацию рабочей точки чувствительного элемента по электрическим режимам, автоматическую регулировку усиления, коммутацию электрического сигнала (для многоэлементных ФПУ и ТПУ). Таким образом, ФПУ и ТПУ по существу являются сложными функциональными изделиями электронной техники.

Развитие приемников излучения идет не только по пути интеграции совмещаемых в них функций преобразования сигнала, но и в направлении наращивания числа чувствительных элементов в одном приборе. Применение многоэлементных приемников излучения не только способствует улучшению тактико-технических характеристик традиционных оптико-электронных устройств, в которых использовались одноэлементные фотоприемники (тепловые головки самонаведения, теплопеленгаторы, оптические локаторы), но и открывает возможности для решения на более высоком техническом уровне целого ряда задач, часть которых ранее решалась с использованием радиотехнических или иных принципов, а некоторые стало возможным решить только благодаря использованию оптических методов обработки информации.

К числу новых задач, решаемых с использованием многоэлементных структур фотоприемников, можно отнести следующие: разработку оптических и голографических запоминающих устройств, многоканальных оптронных устройств, устройств обработки радиолокационных сигналов в РЛС, создание приборов ночного видения на основе твердотельных преобразователей изображения и передающих телевизионных устройств на основе твердотельных аналогов передающих телевизионных трубок, устройств ввода и вывода информации для ЭВМ, оптических линий связи и др.

При использовании многоэлементных приемников для съема информации с каждого канала в состав ФПУ может входить также схема коммутации. До недавнего времени эта функция возлагалась на внешний коммутатор.

В последние годы благодаря дальнейшему изучению свойств МДП-структур (металл-диэлектрик-полупроводник) удалось найти пути создания фоточувствительных структур, в которых функции коммутации сигнала осуществляются в самом объеме фоточувствительного материала. Эти принципы реализуются в фотоприемниках на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС и ПЗИ).

Технология изготовления подавляющего большинства приемников излучения как в одноэлементном, так и в многоэлементном исполнении в основном базируется на тех же принципах, что и производство полупроводниковых приборов (п/п диодов, транзисторов) и интегральных микросхем. Элементы фото- и теплоприемных устройств, осуществляющие согласование чувствительного элемента с электронным трактом, усиление и всю последующую обработку электрического сигнала, (в том числе и его коммутацию), изготавливаются полностью с использованием методов микроэлектроники как на отдельных полупроводниковых структурах, так и в одном монокристалле вместе с фоточувствительным элементом.

Новое направление электронной техники, возникшее на основе синтеза микроэлектроники и полупроводниковых приемников оптического излучения, получило название **фотоэлектрической микроэлектроники или микрофотоэлектроники**, а изделия в которых: реализуются направления и принципы микрофотоэлектроники называются изделиями микрофотоэлектроники.

Классификация существующих приемников оптического излучения приведена на рис. 3 [35].

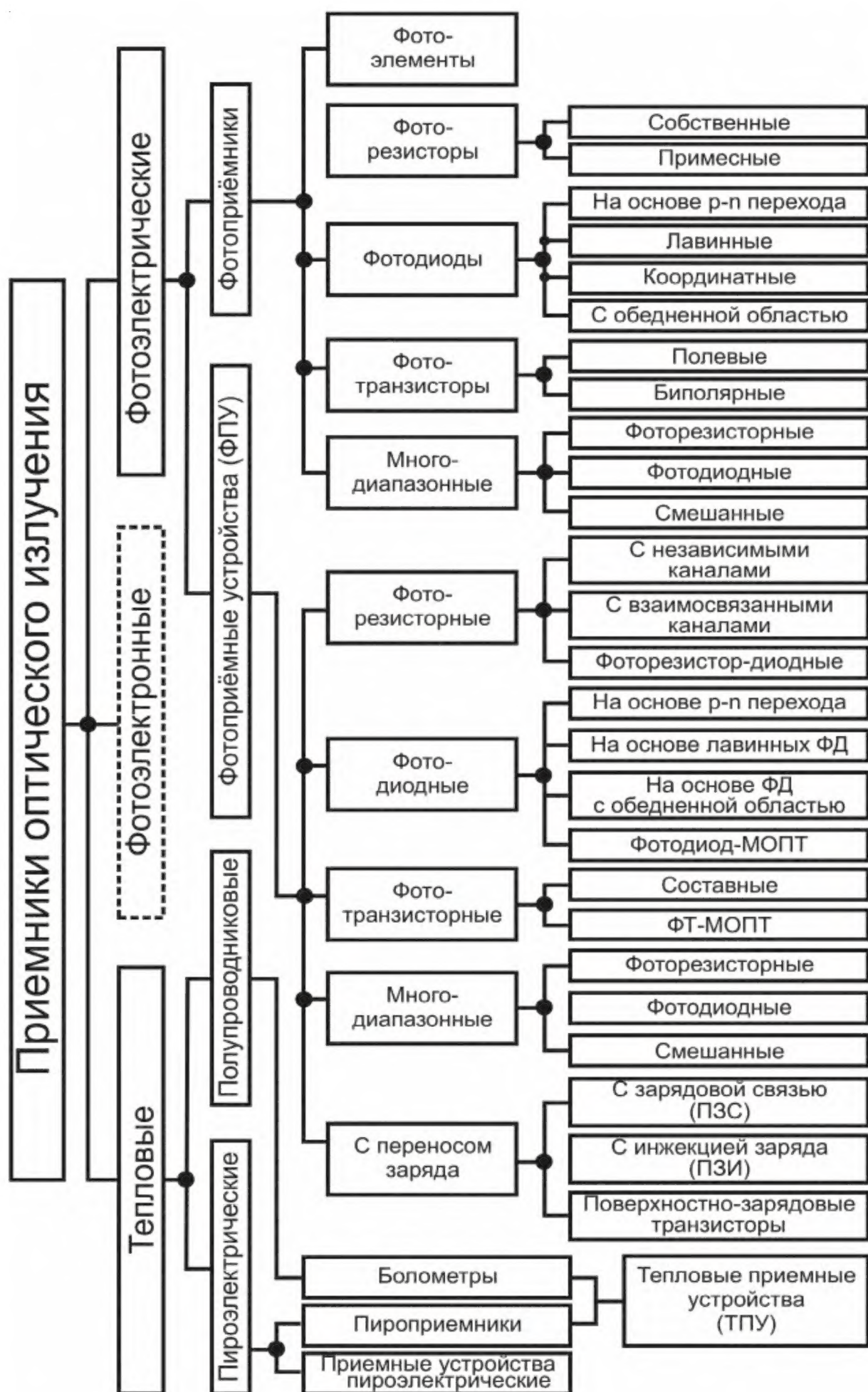


Рис. 3. Классификация приемников излучения.

Объемы выпуска и номенклатура фотоприемников, выпускаемых зарубежными фирмами неуклонно возрастают, растет число фирм разрабатывающих и выпускающих приемники.

По сведениям открытой зарубежной печати с 1959 по 1985 г.г. число фирм, выпускающих фотоприемники, возрастало следующим образом:

Годы	1959 г.	1969 г.	1979 г	1981 г.	1982 г.	1985 г.
Число фирм	около 30	около 100	около 200	более 220	более 300	более 320

Ведущими странами, выпускающими фотоприемники, являются: США - 219 фирм, Англия-24, Япония-22, Франция-15, ФРГ-15 фирм. Суммарный объем выпуска ведущими странами фотоприемников составляет сотни миллионов долларов в год. В табл.П1-П3 приведены названия и структура продукции зарубежных фирм-изготовителей фотоприемников, известных из фирменных каталогов и открытой печати [2, 3, 4, 34, 41, 42, 63, 46, 49-55, 73, 74 и др.].

Хотя рекламный характер сообщений открытой печати содержат далеко неполные, и не всегда объективные, сведения о фирмах-изготовителях фотоприемников, однако, даже имеющиеся данные позволяют делать выводы о структуре продукции и тенденциях развития зарубежной промышленности, выпускающей фотоприемники.

Номенклатура фотоприемников, выпускаемых зарубежными фирмами по данным информационного издания D.A.T.A [2] насчитывает более 4300 марок изделий.

В настоящее время зарубежными фирмами освоен промышленный выпуск практически всех, известных на сегодня разновидностей и типов фотоприемников на основе всех известных полупроводниковых материалов, пригодных для этих целей.

Зарубежными фирмами выпускаются фоторезисторы и фотодиоды с р-п переходом, Р-И-N фотодиоды и фотодиоды с барьером Шоттки; лавинные фотодиоды; фототранзисторы и фототиристоры; фотогальваномагнитные приемники и полупроводниковые фотоэлементы; фоточувствительные интегральные схемы; фотоприемные устройства; формирователи сигналов изображения на основе ПЗИ и ПЗС; тепловые приемники излучения (ТПИ), тепловые приемные устройства и т.п.

Параметры основных типов фотоприемников, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами приведены в табл. 1. Спектральные характеристики некоторых типов фотоприемников приведены на рис. 2г.

Следует отметить, что фотоэлектрические параметры выпускаемых зарубежными Фирмами фотоприемников, как правило, находятся на высоком уровне (очень часто близким к теоретически возможному), что свидетельствует как о высоком уровне применяемых технологических процессов, так и высоком качестве используемых исходных материалов и полуфабрикатов.

Ниже более подробно будут рассмотрены основные типы приемников излучения, нашедших наиболее широкое применение в различных областях науки, техники, промышленности и военном деле.

Таблица 1

Основные параметры
фотоприемников,
выпускаемых ведущими
зарубежными фирмами.

Материал	Тип	Фотозасветочные параметры					Геометрические параметры					Многоэлементные					Основная фирма-изготовитель
		Линия волн, нм	Средняя длина волны, нм	Полоса пропускания, нм	Чувствительность, лк/см ² ·с	Средняя температура, °К	Температура, °К	Угол зрения, град	Размер светового пятна, мм	Формы фот. элементов	Количество ф.э.	Расстояние между ф.э., мм	Размер фот. элемента, мм	Угол между элементами	Расстояние между элементами, мм	Средняя длина волны, нм	
Si	ФБ	0,9	0,8-1,05	5-10 ³	1-10 ²	2,5-10 ³	295	350	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	MI
Si	ФБ	0,9	0,8-1	5-10 ³	1-10 ²	2,5-10 ³	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge	ФБ	0,95	0,8-0,95	8-10 ³	1-10 ²	2,5-10 ³	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge	ФБ	1,5	0,9-1,7	5-10 ³	1-10 ²	2,5-10 ³	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbS	ФП	2,5-2,5	4,0-3,5	8-10 ³	1,5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbS	ФП	2,8	1,0-4,0	4-10 ³	7-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbS	ФП	3,2	1,0-4,5	5-10 ³	1,5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnAs	ФБ	3,5	2,0-3,8	5-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnAs	ФБ	3,2	2,5-3,4	2-10 ³	3,5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnAs	ФБ	3,1	1,8-3,8	4-10 ³	7-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbSe	ФП	3,4	0,5-4,2	2-10 ³	0,5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbSe	ФП	4,1	2-5,3	2-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
PbSe	ФП	4,8	2,7-6,3	3-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnSb	ФП	5,3	3-5,4	8-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnSb	ФП	6,8	3,6-7,3	2-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnSb	ФБ	5,1	2-5,4	1-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
ZnSb	ФБ	6,0	2-7	1-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Au	ФП	5	3-7,5	4-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Hg	ФП	10,5	6-11	1-2-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Cd	ФП	16	11-20	1-2-10 ³	4-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Cu	ФП	23	15-27	1-3-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Zn	ФП	35	20-40	1-3-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Hg: CdTe	ФП	10-11	5-16	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Hg: CdTe	ФБ	10,5	9-13	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Hg: CdTe	ФБ	10,5	9-14	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Hg: CdTe	ФБ	10,5	9-14	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Pb: SnTe	ФБ	11	8-12	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Pb: SnTe	ФБ	10-11	8-12	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: Zn	ФП	6	2-7,5	4-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: Ga	ФП	15	4-17	2-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: Al	ФП	17	4-18	2-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: Sb	ФП	20	4-23	4-10 ³	2-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: As	ФП	22	2-24	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Si: P	ФП	25	2-28	5-10 ³	5-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI
Ge: Zn	ФП	90	2-100	6-10 ³	1-10 ²	1,5-10 ²	295	320	295	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	AEI

AES - Aerojet Electro Systems Co
 ACED - Avco Corporation, Electronics Div.
 BAR - Barnes Engineering Co
 BE - Black Engineering, Inc.
 CEC - Cotron Electronics Corporation
 ECA - Electronic Corp. of America
 ENL - Electro-Nuclear Laboratories, Inc.
 EQQ - EQ&Q Inc./E-O Div.
 HON - Honeywell Radiation Center
 IRI - Infrared Industries Inc.
 ETK - Eltek Corp.
 MI - Mithras, Inc.
 NEC - Networks Electronic Corp.
 PFA - Philco-Ford Corp.
 RAY - Raytheon Co.
 RET - Reticon Corp.
 SAT - Paris, France; (U.S. Representative Eltek Corp.)
 SBRC - Santa Barbara Research Center
 SEN - Sensor Precision Ind.
 TI - Texas Instruments Inc.
 UDT - United Detector Technology Inc.

Основные сведения о конструкциях изделий микрофотоэлектроники

При всем разнообразии конструктивного оформления, изделий микрофотоэлектроники имеют общую структуру. Они состоят из фоточувствительного элемента (ФЧЭ), электронного тракта, подложки (или кристаллодержателя), корпуса с входным окном и выводами. Кроме того, для обеспечения оптимальных условий работы ФЧЭ в состав изделий микрофотоэлектроники могут входить такие вспомогательные устройства, как микрохолодильники, охлаждаемые и неохлаждаемые диафрагмы и фильтры, иммерсионная оптика, интегрирующие камеры, схемы электронного обрамления (для ПЗС и ПЗИ), схемы стабилизации рабочей точки ФЧЭ, вторичные источники питания и т.д.

При разработке конструкции изделий микрофотоэлектроники определяющее значение принадлежит типу фоточувствительного элемента и технологии изготовления (на дискретной элементной базе, с использованием гибридно-пленочной или интегральной п/п технологии и т.п.).

Конструктивное оформление ФЧЭ зависит от технологии его изготовления. Он может быть выполнен как в пленочном, так и в монокристаллическом исполнении. Пленочные фоточувствительные элементы обычно изготавливаются двумя наиболее распространенными методами: методом испарения п/п материала в вакууме, например, термическим, катодным, электронно-лучевым способами), и методом осаждения пленки из раствора. При этом первый метод носит название «физического», а второй «химического». Как правило, пленочная технология изготовления ФЧЭ используется при создании фоторезисторов и болометров.

При монокристаллическом исполнении ФЧЭ изготавливаются из кристаллов полупроводниковых материалов и сегнетоэлектриков, на которые известным, в технологии полупроводниковых приборов, методом, (например, напылением, осаждением и т.п.) наносятся контактные элементы и выделяются фоточувствительные области.

Для создания фоторезисторов, фоточувствительных МДП- и ПЗС-приборов, как правило, используются униполярные структуры, а для создания фотодиодов и фототранзисторов - биполярные полупроводниковые структуры. При этом р-п переходы ФЧЭ могут быть сформированы путем сплавления, диффузии, газовой и жидкофазной (ЖФЭ), ионного легирования, молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), методом внешнего химического напыления (ВХН) соответствующей донорной или акцепторной примеси в исходную пластину полупроводника.

В качестве исходного п/п материала для изготовления фоточувствительных элементов фотоэлектрических приемников широко используются кремний, германий, антимонид и арсенид индия, халькогениды и селениды свинца, твердые растворы тройных соединений типа ртуть-кадмий-теллур (КРТ), свинец-олово-теллур (СОТ) и др. Для изготовления чувствительных элементов тепловых приемников излучения используются тонкие металлические и полупроводниковые пленки, и сегнетоэлектрики.

Конфигурация (топология) чувствительных элементов может быть самой разнообразной - круглой, прямоугольной, крестообразной, уголковой и т.п., что определяется назначением изделия.

При использовании в качестве фоточувствительных элементов примесных полупроводников (легированного кремния и германия) и для уменьшения длины ФЧЭ заднюю поверхность элемента обрезают под углом Брюстера. Изготовление ФЧЭ, например, из примесного германия с обратной стороной в виде двугранного угла, равного 62° увеличивает эффективную длину элемента (в направлении оптической оси) в 3 раза [35].

При необходимости использования ФчЭ с малыми геометрическими размерами наиболее эффективным является применение интегрирующих камер, в которые помещают фоточувствительный элемент. При малых углах зрения (меньше 15°) использование интегрирующих камер увеличивает чувствительность приемника в 2-5 раз в зависимости от конструкции камер.

Чувствительные элементы пироэлектрических приемников полного поглощения выполняют в виде конусообразного, клинообразного или сферического черного тела.

Чувствительные элементы большинства известных приемников излучения и приемных устройств (ФПУ, ТПУ) при помощи клея, компаунда или припоя закрепляют на специальной подложке или кристаллодержателе. В качестве подложки обычно используются материалы, имеющие термический коэффициент линейного расширения (ТКР), близкий к ТКР материала ФчЭ. Наиболее широкое распространение в качестве подложек получили ковар, молибден, медь, стекло, кремний, лейкосапфир, плавленый кварц, ситалл, керамика, слюда и др. материалы. В отдельных случаях на подложке вместе с чувствительным элементом располагают электронный тракт приемного устройства (усилитель фотосигнала, коммутатор и др.), выполненные в виде полупроводниковой и гибридной интегральной микросхемы.

Для защиты подложки и размещенных на ней элементов от воздействия вредных факторов окружающей среды их помещают в специальный корпус. Неохлаждаемые чувствительные элементы и микросхемы, предназначенные для использования в составе изделий микрофотоэлектроники устанавливают в пластмассовые, металлостеклянные или металлокерамические корпуса. Во многих случаях используются типовые корпуса, применяемые для герметизации микросхем и полупроводниковых приборов, но в крышке корпуса устанавливается окно, прозрачное для излучения. Многоэлементные ФчЭ и многоканальные приемные устройства размещаются в много выводных корпусах.

Для работы элементов приемников излучения, чувствительных в средневолновой и длинноволновой областях ИК-спектра необходимо охлаждение чувствительного элемента. При этом рабочая температура должна быть ниже температуры тепловой генерации носителей с примесных или «мелких» уровней. Для различных п/п материалов она может составлять от 250 до 4°K .

Корпуса охлаждаемых приемников излучения выполняют в виде миниатюрных криостатов типа сосуда Дьюара. Криостат представляет собой сосуд с двумя стенками, пространство между которыми откачено до высокого вакуума. Для предотвращения запотевания чувствительного элемента и входного окна приемника давление внутри корпуса не должно превышать 10^{-3} мм. рт. ст. при нормальной температуре окружающей среды, а при воздействии повышенной температуры давление внутри корпуса не должно превышать 10^{-5} мм. рт. ст. В криостате имеется специальная полость для заполнения хладагентом (твердым или жидким) или размещения устройства охлаждения. «Дно» полости, как правило, соединяется с подложкой (или кристаллодержателем) за счет чего обеспечивается охлаждение фоточувствительного элемента. Простые («однопольственные») криостаты обеспечивают охлаждение ФчЭ до температур порядка $77...80^\circ\text{K}$. Для охлаждения чувствительного элемента ниже температуры 77°K используют специальные криостаты с двумя (или тремя) полостями, заливаемыми различными хладагентами. Корпуса охлаждаемых приемников изготавливают из стекла, металла, керамики или комбинированными - металлостеклянными или металлокерамическими.

Входные окна приемников излучения изготавливают из германия, кремния, лейкосапфира, стекла, оптической керамики и др. материалов прозрачных в рабочей (для конкретного типа изделий) области спектра (см. рис.26). Для уменьшения коэффициента отражения излучения, на входные окна наносят просветляющие покрытия. Входное окно обычно впаивается (или клеивается) непосредственно или через компенсирующие элементы в наружную стенку корпуса-криостата.

В целях повышения потенциальной надежности приемников их внутренняя полость может заполняться осушенным воздухом или инертным газом. Для сохранения вакуума в приборах используются специальные адсорбенты и геттеры.

Быстродействующие фотоприемники со временем выхода на режим до 10 секунд и временем автономной работы до 60 секунд могут выполняться в бескорпусном варианте.

Для увеличения обнаружительной способности ФЧЭ, чувствительность которых ограничена фоном, используют охлаждаемые диафрагмы и фильтры, размещенные внутри криостата. При оптимальном выборе спектральной характеристики охлаждаемого фильтра обнаружительную способность прибора можно увеличить примерно на порядок [35].

Для охлаждения чувствительных элементов приемников излучения применяют следующие системы:

- использующие теплоту испарения или сублимации запасенных криогенных веществ (хладагентов);
- дроссельные, использующие эффект Джоуля-Томпсона;
- на основе газовых машин с внутренней регенерацией тепла (расширительные машины);
- радиационные;
- термоэлектрические.

Первые три системы условно классифицируются на системы охлаждения расходного типа и системы с замкнутым циклом.

Жидкостные и твердотельные системы охлаждения используют в качестве хладагентов жидкости, кипящие при низкой температуре, в качестве которых обычно применяют сжиженные газы. Некоторые характеристики наиболее распространенных хладагентов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Некоторые характеристики наиболее распространенных хладагентов

Хладагент	Температура кипения при давлении 760 мм. рт.ст.		Хладагент	Температура кипения при давлении 760 мм. рт.ст.	
	°К	°С		°К	°С
Аммиак	239,5	-33,5	Воздух	81,0	-192
Углекислота	194,5	-78,5	Азот	77,2	-195,8
Фреон-13	191,5	-81,5	Аргон	37,4	-235,6
Этилен	169,1	-103,9	Неон	27,1	-245,9
Метан	111,5	-161,5	Водород	20,3	-252,7
Кислород	90,2	-182,8	Гелий	4,1	-268,9

Жидкостные системы охлаждения разделяются на совмещенные, в которых приемник конструктивно объединен с сосудом Дьюара, содержащем хладагент (в случае использования жидкого хладагента такие приборы называют «заливными»), и дистанционные с трубопроводом соединяющим приемник с сосудом Дьюара или баллоном с жидким хладагентом.

В твердотельных системах охлаждения в качестве хладагента наиболее широкое распространение получила сублимированная углекислота («сухой лед»), которая, сформированная в виде таблетки, размещается в полости корпуса-криостата приемника излучения.

Для получения температур ниже температуры кипения охлаждающей жидкости используют откачку паров хладагента до затвердевания последнего. В этом случае твердый азот, например, обеспечивает температуру охлаждения ФчЭ порядка 54-58°K. Однако, при этом становится обязательным дополнительное охлаждение прибора жидким азотом, заливаемым в специальную полость корпуса-криостата приемника излучения.

При необходимости обеспечения минимальных габаритных размеров приемника излучения, работающего в условиях механических воздействий (вибрации, ударов и т.п.) жидкостные и твердотельные системы охлаждения, как правило, не используются. В этом случае наиболее широкое распространение получили дроссельные охлаждающие устройства, основанные на эффекте Джоуля-Томпсона.

Эффект Джоуля-Томпсона состоит в понижении температуры газа за счет быстрого адиабатического расширения при понижении давления этого газа, предварительно сжатого до 50-350 атм. Устройство охлаждения, основанное на эффекте Джоуля-Томпсона, фактически является миниатюрным охладителем газа, т.н. микрохолодильником. Газ, выходящий из дроссельного отверстия (дюзы) микрохолодильника, сжимается и охлаждает чувствительный элемент приемника излучения. Конструкции микрохолодильников, основанных на эффекте Джоуля-Томпсона, могут быть весьма разнообразны, и при их помощи возможно охлаждение чувствительных элементов до температуры 4,2 К. Расход газа микрохолодильником составляет от 3 до 300 нл/мин. в зависимости от конструкции микрохолодильника и корпуса-криостата. Время готовности (выхода на режим) составляет от 2 секунд до 30 минут [64-67].

С целью уменьшения потерь хладагента, связанных с избыточной хладопроизводительностью в условиях обеспечения малого времени выхода на режим, для охлаждения ФчЭ используют микрохолодильники с регулируемым расходом газа, т.н. саморегулирующиеся микроохладители (СРМО), которые позволяют снизить расход хладагента в 1,5-3 раза.

В расходных системах охлаждения не производится повторный сбор и использование хладагента. Для изделий с длительным циклом работы применяются устройства охлаждения с замкнутым циклом, когда использованный хладагент собирается и снова пропускается через системы охлаждения.

В замкнутых системах охлаждения с дроссельным микрохолодильником для подачи хладагента используется специальный малогабаритный компрессор. В этом случае из компрессора газ поступает в микрохолодильник дросселируется в нем, отводя при этом тепло от охлаждаемой поверхности. Расширенный газ, двигаясь противотоком и омывая наружную поверхность холодильника, возвращается в компрессор для повторного использования.

Дроссельные системы охлаждения имеют невысокий коэффициент полезного действия. Повышение КЦД достигается за счет использования специальных газовых холодильных машин (ГХМ), или газовых криогенных машин (ГКМ), использующих адиабатическое расширение сжатых газов.

В настоящее время для охлаждения приемников излучения наиболее широкое применение нашли следующие типы расширительных машин:

1 - поршневые регенеративные расширительные машины, работающие по принципу Мак-Магона;

2 - расширительные регенеративные машины с вытеснителем, работающие по принципу Джиффорда-Мак-Магона;

3 - поршневые машины, работающие по обратному циклу Стирлинга (машины типа «Филипс»); поршневые детандеры и турбодетандеры.

Следует отметить, что при использовании газовых машин корпус-криостат приемника излучения «надевается» на теплообменник ГХМ (ГКМ), превращая приемник в устройство типа «приемник излучения - газовая холодильная машина». В нашей стране такое устройство получило условное наименование фотоприемного комплекса (ФК).

Кроме указанных чистых газов в системах охлаждения приемников излучения могут использоваться многокомпонентные газовые смеси. Применение смесей дает значительное увеличение хладопроизводительности, а следовательно, и КПД системы охлаждения. Согласно данным работы [70] в случае использования смеси хладопроизводительность может быть увеличена, примерно в 3 раза.

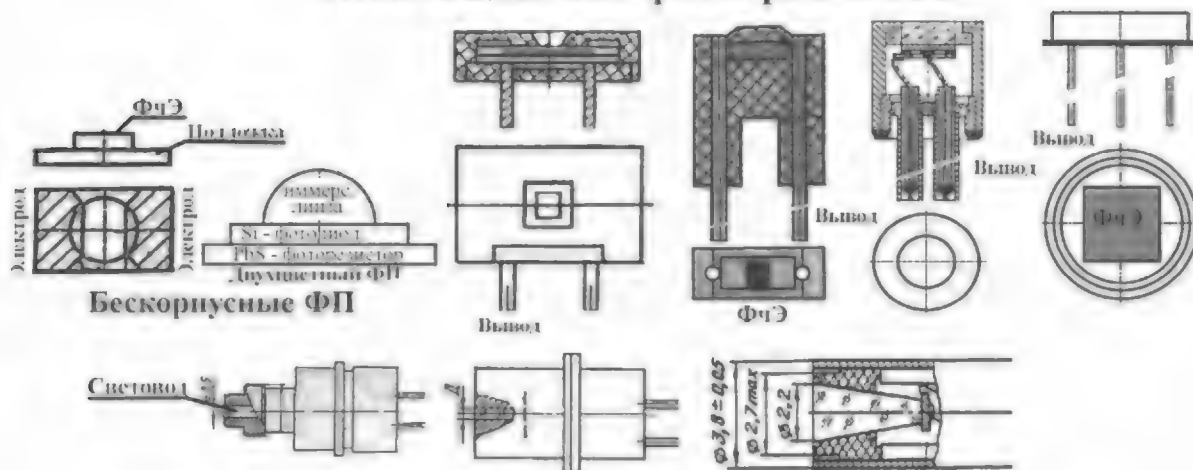
Одним из методов охлаждения чувствительных элементов приемников излучения работающих на космических объектах является использование пассивных радиаторов отводящих тепло от приемника непосредственно в космическое пространство, которое является низкотемпературным теплоприемником. Эффективная (равновесная) температура излучения звездного неба ниже 10°K [71]. Система с радиатором «смотрящим» в космос полностью пассивна, обладает высокой надежностью и большим сроком службы. Площадь и масса радиатора зависят от тепловой нагрузки.

Работа термоэлектрических охладителей (ТЭО) основана на использовании термоэлектрического эффекта Пельтье, заключающегося в поглощении тепла на одном спае двух проводников и выделении его на другом при прохождении через них электрического тока. Термоэлектрические охладители представляют собой модули, в которых электрически последовательно соединены ветви полупроводниковых материалов n-и-p-типа так, что холодные спаи образуют теплопоглощающую, а горячие - тепло выделяющую поверхности. Для увеличения достижимого перепада температур применяют каскадные охладители, в которых тепловыделяющая поверхность каждой последующей ступени охлаждается теплопоглощающей поверхностью предыдущей [68].

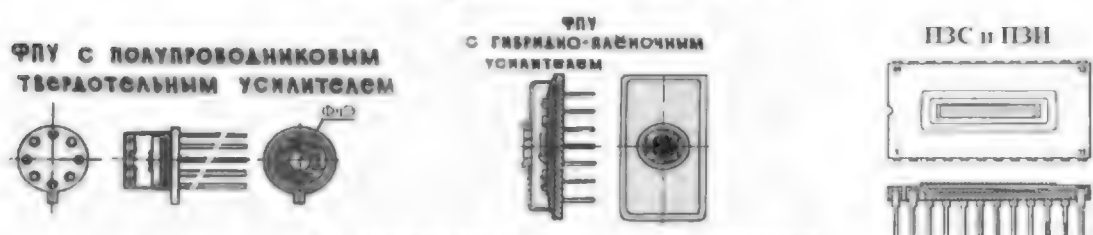
Сравнительные характеристики систем охлаждения приемников излучения приведены в табл. П4.

На рис. 4 в качестве примера приведены возможные варианты конструктивной реализации фотоприемников.

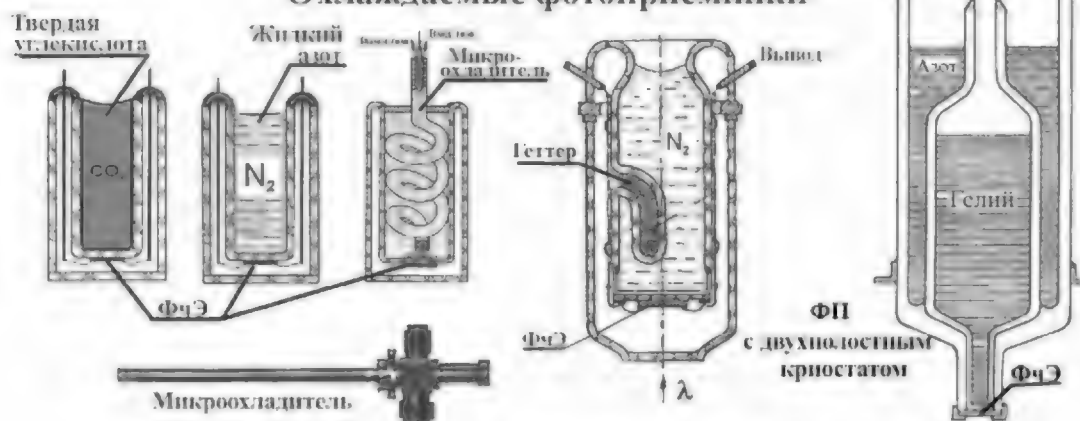
Неохлаждаемые фотоприемники



Фотоприемники для ВОЛС



Охлаждаемые фотоприемники



Охлаждаемые фотоприемные устройства

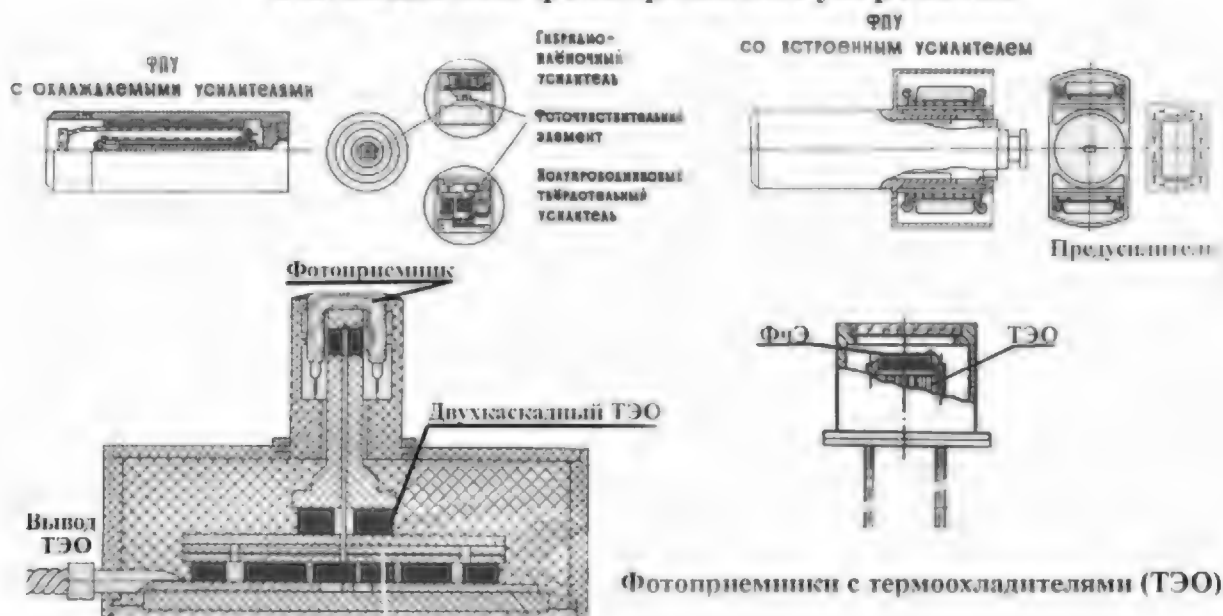


Рис. 4. Возможные варианты конструктивной реализации фотоприемников.

Характеристики основных типов фотоприемников

Фотоприемники на основе кремния

Кремниевые фотоприемники предназначены для работы в ультрафиолетовой, видимой и ближней коротковолновой части спектра излучения. Эти фотоприемники по номенклатуре, объему выпуска, степени освоения и широте применения занимают ведущее место. В настоящее время выпуском кремниевых фотоприемников занимаются более 240 зарубежных фирм. Зарубежными фирмами выпускается широкий ассортимент кремниевых фотоприемников, среди которых фоторезисторы выпускают более 90 фирм; фотодиоды с р-п переходом, фотодиоды с барьером Шоттки и с инверсной базой - выпускают около 200 фирм; Р-I-N фотодиоды выпускают около 60 фирм; лавинные фотодиоды более - 40 фирм; фототранзисторы - около 30 фирм.

подавляющее большинство зарубежных фирм при изготовлении кремниевых фотоприемников используют современные групповые планарные технологические процессы и совершенное оборудование, позволяющее выпускать недорогие и высококачественные фотоприемники с ФЧЭ практически с топологией произвольной формы, а также линейки, матрицы и ПЗС-структуры. Причем линейные и матричные структуры выпускают более 100 зарубежных фирм.

Фотодиоды, предназначенные для работы в УФ-области спектра обладают чувствительностью в диапазоне 0,17...1,1 мкм, при $\lambda_{\max}$, равной 0,7...0,95 мкм.[5]. Лучшие образцы фотодиодов имеют эквивалентную мощность шума (ЭМШ или NEP) порядка $2,5 \cdot 10^{-14}$ Вт * Гц^{-1,2}, при токовой чувствительности 0,6 А/Вт (при 0,95 мкм) и 0,18 А/Вт при 0,23 мкм.

Кремниевые пороговые фотодиоды имеют ЭМШ порядка $8 \cdot 10^{-16}$ Вт * Гц^{-1,2} на длине волны 0,85 мкм и $3 \cdot 10^{-15}$ Вт * Гц^{-1,2} на длине волны 0,55 мкм. Спектральный диапазон фотодиодов находится в пределах от 0,43 до 1,1 мкм.

Размеры ФЧЭ кремниевых фотодиодов находятся в пределах: от единиц до сотен мм², количество элементов в одной линейке до 4096, в матрице до 10 x 300 при минимальном размере элемента 16 x 15 мкм.

Цена одноэлементных кремниевых фотодиодов колеблется от единиц долларов до 380\$, в зависимости от параметров. Цена линеек и матриц с самосканированием составляет от 160 до 4000\$. Для регистрации лазерного излучения и применения в системах оптической связи и дальнометрии зарубежными фирмами выпускаются лавинные фотодиоды (ЛФД). Параметры некоторых ЛФД приведены в табл. 3.

Диапазон спектральной чувствительности кремниевых ЛФД составляет 0,7...1,15 мкм. ($\lambda_{\max} = 0,85-0,9$ мкм). Типовые значения спектральной чувствительности лучших образцов фотодиодов составляют 75 А/Вт при квантовой эффективности 80% на длине волны 0,9 мкм.; и 20-25 А/Вт при квантовой эффективности 20% на длине волны 1,06 мкм. Пробивное напряжение 225-450 В, коэффициент лавинного умножения 100-150, ЭМШ от $3,5 \cdot 10^{-15}$ Вт * Гц^{-1,2} до $1,5 \cdot 10^{-14}$ Вт * Гц^{-1,2} на длине волны 0,9 мкм. и от $4 \cdot 10^{-14}$ Вт * Гц^{-1,2} до $1 \cdot 10^{-12}$ Вт * Гц^{-1,2} на длине волны 1,06 мкм.

Цена лавинных фотодиодов колеблется от 197 до 695\$.

Наиболее высокий уровень параметров серийных фотодиодов на основе кремния обеспечивают фирмы EGG, Meret (США), Centronic (Англия), Hamamatsu (Япония), CIT Alcatel (Франция) и др. [5-7].

Лучшие образцы кремниевых Р-I-N фотодиодов, работающих в диапазоне 0,35...1,15 мкм. имеют токовую чувствительность 0,5 А/Вт на длине волны 0,9 мкм. и 0,42 А/Вт при длине волны 1,06 мкм. Рабочее напряжение фотодиодов до 180В, ЭМШ от 2,2 до $5,6 \cdot 10^{-13}$ Вт * Гц^{-1,2} на длине волны 1,06 мкм. Площадь ФЧЭ от 1 до 100 мм, количество элементов от 1 до 100 [5, 7, 25, 27]. Цена Р-I-N фотодиодов составляет от 25 до 325\$. Цена кремниевых фоторезисторов колеблется от единиц до 1000 долларов в зависимости от количества фоточувствительных элементов и уровня фотоэлектрических параметров [27].

Типовые параметры кремниевых фотодиодов приведены в табл. 3.

ТИПОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОПРИЁМНИКОВ
УФ и ближнего ИК-диапазона излучения
выпускаемых, ведущими зарубежными фирмами

Таблица 3

Материал р-н	Тип	Спектр. диапазон $\Delta\lambda$, нм	λ_{max} , нм	Обратная поверхностная чувствительность $D_{\lambda, \text{вн}} \cdot 10^4$	ЭМЧ (нр) в т-х $\lambda, \text{нм}$	Чувствительность $S_{\lambda, \text{вн}}$ ($\lambda, \text{нм}$)	квант. эфф. $\eta, \%$	Рабочая температура фотод. $^{\circ}\text{C}$	Время задержки $\tau_{\text{за}}, \text{нс}$	Сопротивление при $U_{\text{см}} = 0$ $R, \text{МОм}$	Ёмкость $C_{\text{ф}}$, пф	Коэфф. цикл. амплитуды уменьшения M	Пробивн. напряж. $U_{\text{пр}}, \text{В}$ ($U_{\text{пр}}, \text{В}$ по боков. напряж.)	Геометрические параметры				Ведущие фирмы изготовители
														площадь фотод. мм^2	форма фотод.	кол-во элементов	многоэлементные	
														фотод.	фотод.	фотод.	фотод.	
														фотод.	фотод.	фотод.	фотод.	
Si	ФД диф. п-н	0,2-1,15	0,95		$(2-10) \cdot 10^{-10}$ $(7-30) \cdot 10^{-10}$	0,6 (0,9) 0,15 (0,35) 0,18 (0,23)		300	0,025- 0,075	5-100	150-9000			5-314	0,0,0			EG & G
Si	ФД p-i-n	0,25-1,15	0,9		$(2-56) \cdot 10^{-10}$ ($\lambda_{\text{вн}}$)	0,6 (0,9) 0,42 (1,06)		300	0,02-0,2		3,5-35		$U_{\text{пр}} \approx 180$	5-100	0,0	до 4	квадрат	— " —
Si	ФД с обратным соединением	0,25-1,1	0,9		$0,7 \cdot 10^{-10}$ $2,0 \cdot 10^{-10}$	5 (0,23) 40 (0,43) 55 (0,65)		300			5-400			1-300	0,0			Centronic
Si	ФД диф. п-н	0,17-1,2	0,8	10^{13}		0,25 (0,4)		300	1,5					4	0,0			Meret
Si	ФД с обратным соединением	0,25-1,15	0,85		$(2-3) \cdot 10^{-10}$ ($\lambda_{\text{вн}}$)	0,07 (0,25) 0,25 (0,4)		300	0,5-15		100-2400			51-100	0,0			VDT
Si	ФД диф. п-н	0,2-1,2	0,7		$1-6 \cdot 10^{-10}$	0,02 (0,2) 0,09 (0,3) 0,4 (0,6)			6-45					1,7-100	0,0			Hamamatsu
Si	ФД переходный	0,43-1,1	0,84-0,85	$1-2 \cdot 10^{10}$	$0,8 \cdot 10^{-10}$ $2,0 \cdot 10^{-10}$	0,5 (0,25) 0,4 (0,65)		263- 333	0,4-2,5 (10^{-10} нс)	5-50 нс	60-700			1,5-6,6	0			— " —
Si	ФД	0,25-1,1	0,84-0,85			0,4 (0,63)		300						2,25	0	до 31	линейка	— " —
Si	АФД	0,7-1,15	0,85-0,9		$(2-35) \cdot 10^{-10}$ $4,0 \cdot 10^{-10}$	75 (0,9) 85 (0,82) 95 (1,06)	60 (0,9) 77 (0,82) 80 (1,06)	233- 343	0,0005- 0,002	100-150	2-4		225-450	0,03-7	0,0			RCA Centronic CIT Alcatel
Ge	АФД	0,5-1,7	1,2-1,3		$\leq 1 \cdot 10^{-10}$	0,6 (1,2)	55 (1,2)	300	0,003		10			0,004- 0,03	0			Oriel GmbH. CIT Alcatel
Ge	ФД	0,5-1,8	1,5	$2 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^{10}$ ($\lambda_{\text{вн}}$)		0,7 (0,5)		77-300	0,005- 0,01					1-100	0,0			Judson Infrared Inc.
Ge	ФД переходный	0,5-1,8	1,55		10^{-10} $(\lambda_{\text{вн}})$	0,7 (1,55) 0,97 (1,5)		300	0,001- 0,003					0,03-0,8	0,0			Ford Aerospace
GaAs	ФД	0,89-1,8			10^{-10} ($\lambda_{\text{вн}}$)	0,4		300	0,01		5			~16	0			Meret
GaAsP	ФД	0,4-0,7	0,84		$1 \cdot 10^{-10}$	0,18 (0,64)		300			18			1-25	0,0			Mess-Vogeltechnik
GaAsP	ФД	0,41-0,7	0,84		$5 \cdot 10^{-10}$	0,23 (0,64)		300						~1-2	0,0			Hamamatsu

Фотоприемники на основе германия

Фотоприемники на основе германия (Ge) выпускают более 50 зарубежных фирм, из них 50 фирм выпускает фотодиоды, около 10 - фоторезисторы, более 10 выпускают ЛФД и 8- линейки и матрицы на основе германия.

По сравнению с кремниевыми приборами германиевые имеют более широкую спектральную область чувствительности от 0,4 до 1,7 мкм и сравнительно высокий квантовый выход в этом диапазоне, мало зависящий от температуры.

Лучшие образцы пороговых германиевых фотодиодов имеют токовую чувствительность порядка 0,97 А/Вт (на длине волны 1,5 мкм) и 0,7 А/Вт на длине волны 1,55 мкм. Диапазон спектральной чувствительности - от 0,5 до 1,8 мкм, при $\lambda_{\text{макс}}$, равной 1,55 мкм, ЭМШ от $1 \cdot 10^{-16}$ до $1 \cdot 10^{-15}$ Вт * Гц⁻¹.

Германиевые лавинные фотодиоды обладают чувствительностью в диапазоне 0,5 - 1,7 мкм. ($\lambda_{\text{макс}} = 1,2 - 1,3$ мкм.) .Токовая чувствительность ЛФД в максимуме спектральной чувствительности составляет 0,6 А/Вт при квантовом выходе 55%. Лучшие образцы фотодиодов имеют ЭМШ порядка $1 \cdot 10^{-11}$ Вт * Гц⁻¹. Коэффициент лавинного умножения до 10.

Размер фоточувствительных элементов германиевых фотодиодов от 2 единиц до 100 мм², площадь ФЧЭ пороговых фотодиодов от 0,03 до 2 мм², а лавинных 0,004 ... 0,03 мм² [3, 7, 5, 26, 23, 27].

Наиболее высокие параметры германиевых фотодиодов обеспечивают фирмы Oriel (ФРГ), CIT Alcatel (Франция), Ford Aerospace (США).

Цена германиевых фотодиодов колеблется от 20 до 1000\$, в зависимости от уровня фотоэлектрических параметров и конструктивного исполнения приборов.

Типовые параметры некоторых германиевых фотодиодов также приведены в табл. 3.

Фотоприемники для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС)

В последние годы, наряду с использованием диапазона 0,8-0,9 мкм, происходит освоение спектрального диапазона 1,3-1,6 мкм, оптимального для волоконно-оптических линий связи. Повышенный интерес к этому диапазону объясняется тем, что в этой области спектра необычайно малы оптические потери в световодах ВОЛС: 0,2...0,5 дБ/км по сравнению с 10-20 дБ/км на длине волны 0,8-0,9 мкм.

В качестве фотоприемников для ВОЛС используются высокочувствительные быстродействующие фотодиоды на основе кремния (для диапазона 0,8-0,9 мкм) и германия (для диапазона 1,3-1,6 мкм).

Германиевые фотодиоды, обладая высокой чувствительностью и быстродействием, значительно увеличивают уровень собственных шумов при повышении температуры. Темновой шум можно уменьшить охлаждением фотодиода, но это усложнит и удорожит их конструкцию, а поэтому широко не используется. Использование внутреннего усиления в германиевых лавинных фотодиодах незначительно улучшает порог чувствительности приборов, т.к. при лавинном умножении шумы сильно растут.

Однако, несмотря на указанные недостатки, германиевые фотодиоды являются в некоторой степени стандартными приборами для области спектра 1,3-1,6 мкм, т.к. давно выпускаются промышленностью с хорошо отработанной технологией.

Известны не менее 10 фирм, выпускающих германиевые фотодиоды для ВОЛС, из них в США - 4, в Канаде - 1, во Франции - 1, ФРГ - 1, в Англии - 1, в Японии - 2. Из этих 10 фирм, не менее 6-ти выпускают лавинные германиевые фотодиоды, а две фирмы – и ФД и ЛФД.

Параметры лучших германиевых фотодиодов, выпускаемыми фирмами Judson, Rotin, Laser Diode (все США); Opto-Electronics (Канада); Oriel gmbH (ФРГ); CIT Alcatel (Франция), NEC (Япония) приведены в табл. 4 и 5. Эквивалентная мощность шума лучших германиевых фотодиодов достигает $1 \cdot 10^{-12}$ Вт * Гц^{-1/2}. Постоянная времени достигает 0,3-0,5 нс, что соответствует ширине полосы пропускания оптико-электронного тракта 300...500 мГц. Фирма Opto-Electronics выпускает германиевые фотодиоды с чрезвычайно малой постоянной времени, менее 0,05 нс, но с ЭМШ $1 \cdot 10^{-10}$ Вт * Гц^{-1/2}.

Цена германиевых ФД для ВОЛС составляет 110-200\$, и 3275-4750\$ для ФД с оптическими элементами (линзой, оптическим кабелем и т.п.).

Цена лавинных германиевых фотодиодов составляет 450-700\$ и 5600-5975 долларов для ЛФД с оптическими элементами

Фотоприемники на основе широкозонных полупроводников типа: галлий-мышьяк, галлий-мышьяк-фосфор, галлий-индий-арсенид

Указанные выше недостатки германиевых фотодиодов стимулировали разработку новых приборов для области спектра 1,3-1,6 мкм с использованием широкозонных полупроводниковых соединений InGaAs. Следует отметить чрезвычайно малые значения темновых токов фотодиодов, типичные значения которых составляют 15 нА, что на несколько порядков меньше темновых токов германиевых фотодиодов.

Значительный интерес представляет использование GeInAs фотодиодов в интегральном сочетании с полевым транзистором, (ПТ или FET), при этом затвор ПТ используется в качестве P-I-N фотодиода. Фирмой Lasertron (США) выпускается интегральное фотоприемное устройство (ФПУ), применяемое в ВОЛС для передачи информации со скоростью 100 Мб/с, с вероятностью ошибок 10^{-9} [44].

Около десятка зарубежных фирм занимаются разработкой и выпуском фотоприемников на основе широкозонных полупроводниковых соединений системы A^3B^5 (галлий-мышьяк) и тройных твердых растворов на их основе (галлий-мышьяк-фосфор), (галлий-индий-арсенид).

Усилия зарубежных фирм направлены на создание фотоприемников, (в основном, фотодиодов), с максимумом спектральной чувствительности, близким к длинам волн 0,63; 1,06; 1,54 мкм. При этом, подбором состава материалу достигается высокая квантовая эффективность (в ряде случаев близкая к 100%) и высокие фотоэлектрические параметры.

Параметры лучших фотодиодов конкурентоспособны с кремниевыми и германиевыми фотодиодами (см. таблицу 4)

Диапазон спектральной чувствительности фотодиодов на основе галлий-мышьяк составляет 0,89 - 1,15 мкм., токовая чувствительность в максимуме спектральной характеристики - 0,4 А/Вт, ЭМШ порядка 10^{-13} Вт*Гц^{-1 2}, при диаметре фоточувствительного элемента 4,5 мм. [8].

Диффузионные фотодиоды и фотодиоды с барьером Шоттки на основе соединения галлий-мышьяк-фосфор чувствительны в диапазоне 0,41...0,7 и 0,2...0,7 мкм. соответственно. Токовая чувствительность фотодиодов 0,18-0,23 А/Вт на длине волны 0,64 мкм. и 0,15...0,21 А/Вт на длине волны 0,54 мкм., эквивалентная мощность шума (ЭМШ) составляет от $5 \cdot 10^{-15}$ до $5 \cdot 10^{-14}$ Вт *Гц^{-1 2}.

Известны 9 фирм выпускающих фотодиоды на основе соединения галлий-индий-мышьяк. Из них в США - 4 фирмы, в ФРГ - 1, Франции - 1, Англии - 1, Японии - 1. По-видимому, число фирм выпускающих фотодиоды на основе GeInAs будет расти, а выпуск германиевых фотодиодов для ВОЛС либо будет сокращаться, либо останется на прежнем уровне.

Наибольшие достижения в, создании фотодиодов на основе соединений A³B⁵ имеют фирмы Meret (США), Hamamatsu {Япония), Mess-V.Regeltechnik (ФРГ)

Цена фотодиодов на основе соединения галлий-мышьяк составляет от единиц до 80\$, а на основе соединения галлий-мышьяк-фосфор от 3,5 до 30 долларов. [8, 26, 27].

Основные параметры некоторых образцов фотоприемников, выпускаемых зарубежными фирмами для ВОЛС приведены в табл. 4.

Таблица 4. Типовые параметры некоторых типов фотодиодов для ВОЛС, выпускаемых зарубежными фирмами.

Материал ФЧЭ	Размеры ФЧЭ, мм	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Темно- вой ток, мкА	$S_{\lambda_{\text{макс}}}$, мкм ($\lambda_{\text{раб}}$, мкм)	ЭМШ, Вг*Гц ^{-1/2}	Постоян- ная временн., нс	Ведущие фирмы- изготовители
Ge	Ø 1,0	0,5...1,9	1,5	1...6	0,2...0,7(1,15) 0,8(1,43)	от $1 \cdot 10^{-11}$ до $3 \cdot 10^{-12}$	20...150	Rotin (Англия)
Ge	от Ø1,0 до Ø10	1,1...1,7 0,8...1,8 0,8...2,0	1,5	н/д	0,7(1,15) 0,6(1,3)	н/д	1,0	Judson (США)
Ge	0,075 x 0,115	0,5...1,8	1,5	н/д	0,15...0,25 (1,15)	$1 \cdot 10^{-10}$	0,05...0,08	Optoelec (Канада)
Ge (ЛФД)	Опт. разъем	1,0...1,6	1,5	0,3...0,5	$\eta=75\%$	н/д	0,5...10	NEC (Япония)
Ge (ЛФД)	Ø0,07... 0,2	1,1...1,6	1,5	0,5...1,2	от 0,6 (M=10) до 8(M=10) 1,3мкм	$1 \cdot 10^{-10}$	0,08...0,3	Laser Diod США CIT Alcatel (Франция)
GaInAs	Ø0,07... 0,2	1,3...1,55	н/д	н/д	0,6 (1,3) 0,75(1,55)	н/д	1,0	RCA (США)
GaInAs	Ø 0,1	0,9...1,7	н/д	0,015... 0,04	$\eta=50\%$	н/д	0,5	Lasertron (США)
GaInAs	0,1 x 0,1		1,3		0,35	н/д	1...2,5	Pressey (Англия)
GaInAs	0,1 x 0,1		2,6	0,015... 0,04	0,5	н/д	10...25	Pressey (Англия)

Фотоприемники на основе сернистого свинца

Сернистый свинец (PbS) более 40 лет продолжает оставаться наиболее распространенным материалом для изготовления фоторезисторов, работающих в спектральном диапазоне от I до 4,5 мкм.

Выпуском фоторезисторов на основе сернистого свинца занято около 40 зарубежных фирм, ведущими из которых являются: Barnes Ing., SBRC, Infrared Ing. (США); Mullazd (Англия); SAT (Франция); Hamamatsu (Япония); Optoelectronics (Канада) и др.

Номенклатура фоторезисторов на основе сернистого свинца по данным справочника DATA [2] составляет более 200 типов приборов. Фирмами выпускаются три группы фотоприемников, отличающихся режимом работы (температурой охлаждения) фоточувствительного элемента:

АТО - группа фоторезисторов, предназначенных для работы при температуре фоточувствительного элемента 295-300°K в спектральном диапазоне от I до 3,5 мкм;

IT0 - группа фоторезисторов, предназначенных для работы при температуре фоточувствительного элемента 193-195°K в спектральном диапазоне от I до 4,0 мкм;

LT0 - группа фоторезисторов, предназначенных для работы при температуре фоточувствительного элемента 77-80°K в спектральном диапазоне от I до 4,5 мкм.

По специальному заказу могут изготавливаться фоторезисторы оптимизированными, для работы при других температурах охлаждения ФЧЭ.

Фоточувствительные слои PbS-приемников получают двумя основными методами: методом термического испарения сернистого свинца и методом химического осаждения его из раствора. Подавляющее большинство зарубежных фирм используют метод химического осаждения сернистого свинца.

В качестве подложек для фоточувствительных элементов используются плавленый кварц или оптическое стекло («фотостекло»), но могут быть использованы и другие материалы, например, лейкосапфир, титанат стронция, кремний, оптическая керамика и т.д.

Большинством зарубежных фирм фотоприемники на основе PbS выпускаются как в одноэлементном, так и в многоэлементном исполнении. Минимальный размер фоточувствительного элемента составляет 25 x 25 мкм при зазоре 10-13 мкм. Расположение фоточувствительных элементов - линейное или матричное. Количество фоточувствительных элементов в одном фотоприемнике может составлять до 1000 (и более по специальному заказу).

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики лежит в пределах $(8 - 15) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приборов, работающих в режиме АТО, $(4 - 6) \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приемников работающих в режиме IT0, и $(1,5 - 2,5) \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приборов работающих в режиме LT0.

С целью повышения обнаружительной способности фоторезисторов в их конструкциях предусматриваются охлаждаемые экраны, диафрагмы и фильтры, что снижает температуру фона и уменьшает угол зрения. Однако, увеличение обнаружительной способности, в этом случае, приводит к росту постоянной времени фоторезистора.

Немногие из приемников ИК-излучения могут сравниться с PbS приемниками по реально достигнутому уровню фотоэлектрических параметров, низкой стоимости и широте диапазона рабочих температур ФЧЭ (от комнатной до азотной).

В течении многих лет приемники на основе PbS являлись кандидатами на замену среди др. ИК-приемников. Однако, универсальность PbS-приемников делает их и до сих пор пригодными для многочисленных применений. Эти приборы и сегодня пользуются большим спросом как для важнейших военных программ, так и для промышленного и коммерческого применения [72].

Цена фоторезисторов на основе PbS колеблется от 8 до 1300\$, в зависимости от количества фоточувствительных элементов и уровня фотоэлектрических параметров.

Основные фотоэлектрические параметры некоторых типов фоторезисторов на основе сернистого свинца приведены в табл. 1 и 6. [25, 25, 27, 42, 43].

Таблица 5. Основные параметры фоторезисторов на основе PbS, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Темновое сопротив- ление, R_T , МОм	Постоянная времени, мс	$S_{\lambda_{\text{макс}}}$, $\times 10^4$, $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [ТФЧЭ, °К]	$D^*_{\lambda_{\text{макс}}} \times 10^{10}$, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы-изготовители
1...36 мм ²	0,3...3,5	2,2...2,5	0,6...1,5	0,1...0,175	2...8 [298]	4...6	Philips, RTC
1...36 мм ²	1,5...3	1,8...2,3	0,6...1,5	0,25	15...20 [298]	до 1,0	RTC, Mullard
0,0625...1 мм ²	0,7...2,9	2...2,5	0,5...1	0,2	10...40 [298]	5...7	Infrared Ind. Inc.
0,0625...2,5 мм ²	0,7...3,8	3,2	—	1...4	40...100 [195]	10...20	Infrared Ind. Inc.
0,0015... 100 мм ²	0,5...2,8	2...2,2	0,5	0,35	20...100 [195]	9...10	Optoelectronics
1...8 мм ²	1...4	3	1,5	2,5	10 [77]	20	Optoelectronics
0,062...3 мм ²	1...3	2,4	0,3...4	0,5	20...60 [298]	8...15	SBRS
0,062...3,1 мм ²	1...4	2,8	5...10	5	до 100 [190]	40...60	SBRS
0,062...3,1 мм ²	1...5	3,2	10...20	3	до 30 [77]	10...12	SBRS
до 10 мм ²	0,5...2,9	2,0	0,5...3,1	0,05...0,4	[298]	6...15	Sandors Associates Inc.

Фотоприемники на основе селенида свинца

Зарубежными фирмами выпускаются фоторезисторы на основе селенида свинца (PbSe), работающие в диапазоне длин волн от 1 до 7 мкм. Выпуском фоторезисторов на основе селенида свинца занято около 30 фирм.

Фоторезисторы на основе селенида свинца, так же как и на основе сернистого свинца оптимизированы на один из трех температурных режимов ФЧЭ: АТО, ИТО или ЛТО. Номинальная рабочая температура неохлаждаемых фоторезисторов – 295°K (режим АТО). При понижении температуры ФЧЭ увеличивается обнаружительная способность, чувствительность и постоянная времени приемника, правая граница спектральной чувствительности сдвигается в сторону длинных волн.

Фоторезисторы на основе PbSe выпускаются в одно- и многоэлементном исполнении, обычная формы элемента - квадратная. По специальному заказу фирмами изготавливаются ФЧЭ любой геометрической формы. Минимальный размер ФЧЭ 25 x 25 мкм, зазор между элементами от 10 до 50 мкм. Расположение элементов - линейка или матрица. Зазор между линейками от 13 до 25 мкм. Количество ФЧЭ до 200 .максимальный размер ФЧЭ - 10x 10 мм.

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики составляет $(1-5) \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приборов работающих в режиме «АТО» и $(1-3) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для фоторезисторов работающих в режимах «ИТО» и «ЛТО».

Для охлаждения фоточувствительных элементов фоторезисторов на основе селенида свинца используются те же методы, что и для охлаждения фоторезисторов на основе PbS.

Ведущие фирмы изготовители SBRS, Infrared Ind., Optoelectronics.

Цена фоторезисторов на основе селенида свинца составляет от 5 до 1650\$, в зависимости от количества ФЧЭ и уровня фотоэлектрических параметров. [2, 25, 26, 27, 42, 46].

Основные параметры некоторых типов фоторезисторов на основе PbSe приведены в табл. 1 и 6.

Таблица 6. Основные параметры фоторезисторов на основе PbSe, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФтЭ, мм	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Темновое сопротивление, R_T , МОм	Постоянная времени, мкс	$S_{\lambda_{\text{макс}}}$, $\times 10^3$, $\text{В}^* \text{Вт}^{-1}$ [$T_{\text{ФтЭ}}$, К]	$D^*_{\lambda_{\text{макс}}}$, $\times 10^{10}$, $\text{Вт}^{-1} \text{см}^2 \text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы-изготовители
от 0,5x0,5 до 10x10	1...4,5	3,5...4,8	0,5-10 МОм/кВ	1...5	1...10 [298]	0,1...0,5	SBRS
от 0,5x0,5 до 10x10	1...5,5	4,6...4,8	10-15МОм/кВ	10...50	3...80 [193]	1...3	SBRS
от 0,5x0,5 до 10x10	1...6,5	4,8...5,1	0,3-10 МОм/кВ	15...60	7...100 [77]	1...3	SBRS
от 1 до 9 мм ²	1...4,7	4,1	—	1	2...4 [300]	1...4,5	Infrared Ind. East
от 1 до 9 мм ²	1...5	4,2	—	10	5 [253]	0,75	Infrared Ind. East
от 1 до 9 мм ²	1...5	4,3	—	25	8 [243]	1,3	Infrared Ind. East
от 1 до 4 мм ²	1...5	4,2	—	10	65 [273]	1,2	Infrared Ind. East
от 0,6 до 4 мм ²	1...5,5	4,5	—	50	до 10 [195]	2...4	Infrared Ind. East
от 1x1 до 5x5	0,7...7	4...5,2	—	5...6	1...5	0,2...2	Infrared Ind. Photocon
от 0,06 до 100 мм ²	0,5...7,2	4...5,5	0,1...100	5...60	1 [77]	1...13	Infrared Ind. Inc.
от 0,06 до 100 мм ²	1...5,5	3,9...4,5		1...25	3...8 [77]	0,25...1,3	Infrared Ind. Inc.
до 100 мм ²	1...6,5	5,1	5	25	10 [77]	2	Optoelectronics
до 100 мм ²	0,5...6,8	5	до 10	35	10 [77]	1,5	Optoelectronics

Фотоприемники на основе антимонида индия

Антимонид индия (InSb), по-прежнему, остается наиболее распространенным материалом для изготовления подавляющего большинства фотоприемников, чувствительных в диапазоне 1-7 мкм. Наибольшее распространение получили фоторезисторы и фотодиоды на основе антимонида индия.

Изготовлением фотоприемников на основе антимонида индия занято более 65 фирм, более 53 выпускают фоторезисторы, 33 - фотодиоды. Причем 17 фирм выпускают как фоторезисторы, так и фотодиоды, а 16 фирм занимаются выпуском многоэлементных фотоприемников. Наилучших результатов в разработках и выпуске фоторезисторов на основе антимонида индия достигли фирмы: SBRS, Raytheon, Optoelectronics, Advanced Kinetics, Barnes Eng., Philco-Ford Corp. (все США), Mullard (Англия), RTC (Франция), Fyjisu (Япония). [9, 10]

Величина обнаружительной способности (D^*) InSb-фоторезисторов в максимуме спектральной чувствительности достигает для лучших образцов $1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}$ при углах зрения приемника 60° , и составляет для лучших промышленных образцов $(4-9) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}$ (SBRS, Mullard).

Фоторезисторы выпускаются, как в одноэлементном, так и многоэлементном исполнении, с минимальными размерами фоточувствительных элементов $75 \times 75 \text{ мкм}$ при зазоре между ними порядка 50 мкм . Количество элементов достигает 100 эл (Mullard) и более (до 200). Стоимость одного одноэлементного InSb-фоторезистора составляет от 200 до 1200\$, в зависимости от конструктивного исполнения.

Благодаря существенным преимуществам фотодиодов по сравнению с фоторезисторами в последние годы большинство зарубежных фирм переходят на промышленный выпуск InSb-фотодиодов.

Фотодиоды, по сравнению с фоторезисторами имеют более высокую обнаружительную способность и меньшую инерционность.

Кроме того, наличие мелкого р-п перехода в фоточувствительном элементе фотодиода позволяет использовать для выделения элементов совершенные групповые технологические процессы, такие, как газовая эпитаксия, диффузия и ионное легирование. Это является дополнительным технологическим преимуществом ФД, по сравнению с фоторезисторами на основе InSb, и позволяет получать фоточувствительные структуры произвольной геометрической формы с минимальными линейными размерами и зазорами между ФЧЭ, при достижении высоких фотоэлектрических параметров и большом % выхода годных приборов.

Зарубежными фирмами выпускаются как одноэлементные, так и многоэлементные фотодиоды. Наиболее распространенным является расположение ФЧЭ многоэлементных фотодиодов, как правило, это линейки с традиционным или шахматным расположением элементов. Но конфигурация многоэлементных фотодиодов, изготавливаемых по специальному заказу, может быть и более сложной. Например, в виде креста или сложной мозаики и т.п. Минимальный размер фоточувствительного элемента составляет $50 \times 50 \text{ мкм}$, при зазоре до 25 мкм . Расстояние между линейками фоточувствительных элементов составляет порядка 50 мкм . Количество элементов 112, 148 и более (до 200).

Обнаружительная способность лучших образцов фотодиодов в максимуме спектральной характеристики составляет $1,2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}$ при угле зрения 60° , и $(1-3) \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}$ при углах зрения порядка 20° (фирма SE). При использовании в конструкции приборов холодных фильтров и экранов обнаружительная способность достигает $2,3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0.5}$ (4мкм, 1000, 1,20°).

Стоимость, одноэлементного охлаждаемого фотодиода на основе антимонида индия составляет от 945 до 3500\$, в зависимости от конструктивного исполнения, и до 6000 долларов для многоэлементных приборов. [25, 26, 27, 42, 46]. Типовые параметры фоторезисторов приведены в табл. 1 и 7. Типовые параметры фотодиодов на основе антимонида индия приведены в табл. 1 и 8.

Таблица 7. Основные параметры фоторезисторов на основе InSb, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Коли- чество ФЧЭ	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Темно- вое сопротив- ление, R_T , кОм	Посто- янная време- ни, τ , мкс	$S_{\lambda_{\text{макс}}}$, $\times 10^3$, $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$	$D^*_{\lambda_{\text{макс}}} \times 10^{10}$, $\text{В} \cdot \text{Гц}^{-1}$ $1^* \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы- изготовители
Охлаждаемые фоторезисторы ($T_{\text{фрт}} = 77-80^\circ \text{K}$)									
от 0,15x0,15 до 10x10	60	1	2...5,3	5,3	1...10	10	н/д	3,6	SBRS (США)
от 0,5 до 2 мм^2	н/д	1	1,5...5,5	5,0	н/д	1	1	3,0	Advanced Kinetics
от 0,5x0,5 до 6x0,5	60	1	0,55...5,6	5,3	1...8	2...6	3...45	2...9	Mullard (Англия)
$\varnothing 8$ и $\varnothing 5$ (кольцо)	60	1	0,55...5,6	5,3	0,13... 0,35	2...6	0,06	2,0	Mullard (Англия)
0,225x0,225	60	10...100	5,3	5,3	1...3,5	2...5	12	3,5	Mullard (Англия)
4x4,6x0,5	н/д	1	5,3	5,3	н/д	н/д	3,5...3,8	4...5,5	RTC (Франция)
0,5x0,5	60	н/д	1,2...5,7	5,0	2...10	10	1,5	1...4	Fujitsu (Япония)
Неохлаждаемые фоторезисторы ($T_{\text{фрт}} = 253, 293^\circ \text{K}$)									
4 мм^2	н/д	1	1...7	6,8	0,5	0,1	5,0 [293]	1,5	SBRS (США)
от 2x2 до 6x0,5	до 100	1	1...6,4	5,7... 5,8	0,5	0,1...0,2	1...6 [253]	40	Optoelectronics (США)
6x0,5	60	1	1...7	6...6,3	0,06	0,2	1,0 [293]	20	Mullard (Англия)
2x2x0,5	до 100	1	1...7	5...6,5	0,075... 1,0	0,1	0,3...2,5 [293]	0,85...25	RTC (Франция)

Таблица 8. Основные параметры охлаждаемых ($T_{\text{фчэ}}=77\text{оК}$) фотодиодов на основе InSb, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Колп- чество ФЧЭ (зазор, мм)	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Дина- мическое сопротив- ление, $R_{\text{д}}$, кОм	Постоян- ная време- ни, τ , мкс	$S_{\lambda_{\text{макс}}}$, $\text{А}^*\text{Вт}^{-1}$ ($T_{\text{АЧТ}}=500^{\circ}\text{К}$)	$D^*_{\lambda_{\text{макс}}}\times 10^{10}$, $\text{Вт}^{-1}\text{см}^2\text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы-производители
$\varnothing 0,25 \dots$ $\varnothing 10$ от $0,1 \times 0,1$ до 8×8	$60 \dots 120$	$1 \dots 10$ (0,05)	$1 \dots 5,6$	5,0	20	1	0,35 ($T_{\text{АЧТ}}=500^{\circ}\text{К}$)	0,46...1,0	Barnes Engineering (США)
1 мм^2	120	$1 \dots 10$ (0,025)	$2 \dots 5,3$	5,0	$50 \dots 100$	1	2,0	$7,5 \dots 10$	Jusun Infrared Inc. (США)
от $0,05 \times 0,05$ до $0,2 \times 0,2$	44	$10 \dots 112$ (0,025)	$3 \dots 5,3$	5,3	до 1000	1	0,34 ($T_{\text{АЧТ}}=500^{\circ}\text{К}$)	9,0	Texas Instrument (США)
$\varnothing 0,8 \dots \varnothing 6,5$ от $0,05 \times 0,05$ до $0,7 \times 0,025$	20	$1 \dots 10$ (0,05)	$3 \dots 5$	$4,5 \dots$ 4,6	$10 \dots 500$	1	$2,7 \dots 4,9$	11 и 23 (с холодным фильтром)	Cincinnati Electronics (США)
$\varnothing 0,1 \dots \varnothing 0,3$ от 1 до 5 мм ²	60	н/д	$0,8 \dots 5,5$	4,5	$20 \dots 1000$	1	$0,2 \dots 0,3$ ($T_{\text{АЧТ}}=500^{\circ}\text{К}$)	$1 \dots 2(500^{\circ}\text{К})$ 3 (с холодным фильтром)	Hamamatsu (Япония)
от $0,02$ до 7 мм ²	60	$10 \dots 148$ (0,05)	$2 \dots 5,5$	5	$20 \dots$ 10000	$0,02 \dots 0,2$	$1,3 \dots 3$ ($T_{\text{АЧТ}}=500^{\circ}\text{К}$)	8...20	SBRS (США)
$\varnothing 0,25; \varnothing 0,5;$ $\varnothing 1; \varnothing 2$	до 90	1	$1 \dots 5,5$	5,0	$20 \dots 2000$	1	$\eta=50\%$	до $4,3 \times 10^{13}$ (с холодным фильтром)	SBRS (США)
$0,035 \times 0,035$	н/д	$10 \dots 250$ (0,035)	$2 \dots 5,5$	$5 \dots 5,3$	$1 \dots 500$	1	$\eta=35\%$	1...5	SAT
Фотогальваномагнитные неохлаждаемые									
от $0,4 \times 0,4$	н/д	1	$2 \dots 7$	6,62	$10 \dots 100$ ($\text{В}^*\text{Вт}^{-1}$) [295°K]	0,2	$10 \dots 100$ $\text{В}^*\text{Вт}^{-1}$	$(1 \dots 3) \times 10^8 \text{ ВТ}^{-1}$ $1^*\text{см}^2\text{Гц}^{0,5}$	Electro Nuclear Lab. Honeywell Rad. Center Infrared Ind. Inc.

Фотоприемники на основе соединения кадмий-ртуть-теллур

Зарубежные фирмы проявляют большой интерес к разработке и выпуску фотоприемников на основе твердых растворов типа кадмий-ртуть-теллур (КРТ) [12-14, 16, 17].

В настоящее время выпуском фотоприемников на основе КРТ занято более 70 фирм. Зарубежными фирмами выпускается широкий ассортимент, как фоторезисторов, так и фотодиодов на основе КРТ для использования в широком диапазоне инфракрасной области спектра от 1,5 до 24 мкм.

Выпуск фоторезисторов осуществляется 53 фирмами. Более 30 фирм выпускают фотодиоды, причем 18 фирм выпускают как фоторезисторы, так и фотодиоды. Большинство зарубежных фирм на основе КРТ выпускаются фотоприемники для работы в спектральных диапазонах 3-5 и 8-14 мкм.

Важным достоинством фотоприемников на основе КРТ является возможность их работы в диапазоне 3-5 мкм при относительно неглубоком охлаждении фоточувствительного элемента (до температуры 130-230°K) с применением термоэлектрического охладителя (ТЭО) или без охлаждения вообще (при температуре ФчЭ – 300°K), а также возможность их работы в диапазоне 8-14 мкм при температуре 77-80°K.

Зарубежными фирмами выпускаются как одноэлементные, так и многоэлементные фотоприемники на основе КРТ. Минимальные размеры фоточувствительных элементов составляют 25 x 25 мкм. при зазоре между элементами порядка 10 мкм. Количество ФчЭ в одном приемнике составляет от десятков до 200 элементов и более. По специальному заказу фирмы выпускают фотоприемники с числом элементов до нескольких тысяч [12-14]. Расположение фоточувствительных элементов может быть произвольным, но наиболее широко производятся линейные и матричные структуры.

Выпуск многоэлементных фотоприемников на основе КРТ осуществляется 16 зарубежными фирмами. Из них ведущие SBRS, Honeywell, NERC, IRA (все США); SAN, RTC (Франция); Phillips (Голландия); Mullard (Англия) и др.

Основную проблему представляет промышленное производство исходного материала, необходимого для изготовления ФчЭ. Для производства КРТ-материала в последние годы используются различные методы, которые условно можно разделить на две группы: объемные и эпитаксиального выращивания. Техника объемного («однослойного») выращивания КРТ кристаллов имеет давнюю историю. Однако новые методы многослойного выращивания стали перспективной альтернативой общепринятым методам, из которых наиболее широко известен метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Во многих случаях его успешно заменяют методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и усовершенствованным методом внешнего химического напыления (ВХН).

Одной из причин появления метода МЛЭ является необходимость изготовления так называемых сверхрешеток, т.е. многослойных структур из различных материалов. По этому методу изготавливаются сверхрешетки HgTe (CdTe) HgTe и т.д. Всего до 300 слоев по толщине, причем толщина каждого слоя составляет 50-100 Å. Сверхрешетка позволяет контролировать длинноволновую границу точнее, чем отношение содержания ртути и кадмия в п/п материале, и обеспечивает практически любую длину волны, необходимую для конкретного материала.

Сверхрешетка обычно выращивается на кадмий-теллуровой подложке. Однако, эти подложки дороги, а технология их производства достаточно сложна, если речь идет о размерах превышающих 640 мм². [60].

Среди зарубежных специалистов отсутствует единая точка зрения по вопросу о перспективах использования эпитаксиальных процессов для производства КРТ структур,

В то время как объемная технология близка к технологии изготовления фотодиодных матриц, эпитаксиальная технология еще далека от готовности. Все поставки приборов по контрактам с фиксированной стоимостью относятся к объемным материалам. [60]. Наиболее вероятной следует считать ситуацию, при которой различные технологии производства КРТ-структур будут существовать параллельно, причем каждая из них будет занимать определенное место, на котором будет достигнуто лучшее сочетание стоимости, параметров и качества.

Следует отметить, что для технологии изготовления кристаллов КРТ, как для всякой другой новой технологии существуют определенные ограничения. Так несовершенство поверхности п/п материала приводит к генерированию избыточного шума. Нерешенной проблемой остаются дефекты подложки. Среди других проблем можно указать на высокое давление паров ртути и, следовательно, свойственную им нестабильность, а также повышенную чувствительность КРТ материала к высокой температуре, что влечет за собой значительные технологические, производственные и эксплуатационные сложности.[60]

Величина обнаружительной способности фотоприемников в максимуме спектральной характеристики составляет для лучших промышленных образцов, работающих в диапазоне 3-5 мкм - до $5 \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре фоточувствительного элемента, равной 295°K, и достигает величины $3,5 \cdot 10^9 \dots 2,6 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре ФЧЭ, равной 190 – 230°K, и до $6 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре ФЧЭ – 77°K.

Величина обнаружительной способности фотоприемников в максимуме спектральной характеристики, предназначенных для работы в диапазоне 8-14 мкм составляет от 2,0 до $40 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре фоточувствительного элемента 77-30°K.

Достигнутые значения обнаружительной способности фоторезисторов и фотодиодов на основе КРТ примерно одинаковы, однако, в последнее время предпочтение отдается выпуску фотодиодов, которые наряду с технологическими преимуществами обеспечивают оптимальное согласование фотодиодов с ПЗС-приборами и электронным трактом аппаратуры и не требуют источника смещения.

По оценкам зарубежных специалистов наиболее перспективным является разработка фотоприемников на основе КРТ, предназначенных для военного применения. Например, по оценкам зарубежных специалистов для достижения необходимой разрешающей способности головок самонаведения (ГСН) и обнаружения целей на дальностях не менее 5 км потребуется разработка фотодиодной КРТ-матрицы с количеством элементов порядка 16 000 для ГСН ракет класса «воздух-воздух», и порядка 50 000 элементов для ГСН ракет малой дальности комплексов ПТУР, разрабатываемых по программе «Тэнк Брейкер», что примерно в 50 раз больше, чем обеспечивается современной промышленной технологией изготовления фотоприемников. [56]

Ведущее положение в технологии изготовления ИК-приемников на КРТ для перспективных головок самонаведения тактических ракет занимает фирма SAT. Высокий уровень разработок фирмы подтверждается тем, что в 1983 г. фирма SAT передала лицензию на производство ИК-фотодиодов фирме «Макдонел Дуглас» (США), что позволяет этой фирме в США производить различные типы ИК-приемников, чувствительных в спектральном диапазоне 2...15 мкм, и более узком 8...14 мкм [56].

Цена фоторезисторов на основе КРТ составляет от 1000 до 3700\$, фотодиодов от 1500 до 5700\$. В зависимости от количества ФЧЭ и уровня фотоэлектрических параметров цена приемников на КРТ может достигать 14000-19000\$ и более [13, 26, 27, 46].

Высокая стоимость фотоприемников на КРТ объясняется как высокой стоимостью применяемого материала, так и сложной и дорогостоящей технологией их изготовления. Стоимость применяемого зарубежными фирмами п/п материала составляет примерно 1 млн.долларов за килограмм, при % выхода годные изделий порядка 0,25...0,53% [13,14].

Основные параметры фотоприемников на основе КРТ приведены в табл. 1, 9, 10.

Таблица 9. Основные параметры фоторезисторов на основе КРТ, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Кол- чество ФЧЭ (зазор, мм)	Диапазон спектр. чувствит., мм	$\lambda_{\text{фос}}$ мм	Темповое сопротив- ление, $R_T, \text{ Ом}$	Постоян- ная време- ни, $\tau, \text{ мкс}$	$S_{\text{фос}} \times 10^3$, $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [Г $_{\text{фос}}$, °К]	$D^+_{\text{фос}} \times 10^{10}$, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Г}^{0,5}_{\text{фос}}$	Ведущие фирмы-изготовители
0,025...2,5 мм ²	—	—	1...5	5,0	—	1	н/д [77 - 300°К]	6	Infrared Associates
0,025...2,5 мм ²	—	—	от 1...14 до 1...25	—	—	0,1...0,5	[77°К]	0,5...3,5	Infrared Associates
0,00063 мм ²	—	—	3...5	4...5	—	0,5...1	до 500 [77°К]	0,1...100	Honeywell Elect. Opt.
до 16 мм ²	—	—	8...12	11	—	—	до 10 [77 - 300°К]	3	Spectronics
1...2,5 мм ²	—	—	2...5	—	—	—	1...10 [77°К]	20	New England Research Cen.
1...2,5 мм ²	—	—	от 2...12 до 10...20	—	—	—	0,1...10 [77 - 300°К]	0,5...2	New England Research Cen.
0,00062... 2 мм ²	—	—	2...12	11,5	—	0,2	1...10 [77°К]	1...4	Ford Aerospace
от 0,025x0,025 до 2,5x2,5	60	—	1...5,5	3...5	200	0,05...0,1	[300°К]	0,1...0,2	CRL Inc.
от 0,025x0,025 до 2,5x2,5	60...180	—	2...14	9...13	20	0,05...0,5	1...20 [77°К]	0,5...2	CRL Inc.
0,5x0,5	от 20x26 до 43x58	до 55	8...13	—	25...100	3	1...15 [80°К]	2...5	Philips
от 0,05x0,05 до 1,25x1,25	до 100	до 64	2...5	4,3...5	60...300	3	1...12 [195-220°К]	0,5...1,5	Philips
от 0,1x0,1 до 1x1	30...60	—	6...14	11...13	200...500	0,1...0,8	0,1...100 [77°К]	0,2...2	SBRC

Таблица 10. Основные параметры охлаждаемых фотодиодов на основе КРТ выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Коли- чество ФЧЭ (зазор, мм)	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{дик.}}$, мкм	Динами- ческое сопро- тивле- ние, R_d , кОм	Постоян- ная време- ни, τ , мкс	$S_{\text{дик.}}$, $\text{А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [ТФв, °К]	$D^*_{\text{дик.}} \times 10^{10}$, Вт^{-1} $1 \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{0.5}$	Ведущие фирмы- изготовители
от 0,035x0,035 до 0,2x0,2	30...80	2...400	8...12	10,6	до 150	—	2..4 [770K]	до 4	SAT
от Ø0,15 до Ø0,25	30...80	—	8...14	10,6	0,5	до 200 кГц	[770K]	0,01...0,1	Honeywell Rad. Opt.
от 0,023 до 0,14 мм ²	30...80	—	8...12	10,6	—	0,0016	1,3...3,4 [770K]	0,5	Honeywell Rad. Opt.
от 0,01 до 0,04 мм ²	30...80	—	8...14	10,6	0,1...3	75...1200 МГц	[770K]	0,02...0,3	ETK
0,5 мм ²	30...80	—	2...13	12	0,01	—	до 30 [770K]	2	Texas Instrument
от 0,01 до 4 мм ²	30...80	—	6...13	10,6	—	0,2	3...30 [770K]	0,5...2	SBRs

Фотоприемники на основе соединений свинец-олово-теллур

Наряду с выпуском фотоприемников на основе КРТ зарубежными фирмами осуществляется выпуск одноэлементных и многоэлементных фотоприемников на основе твердого раствора типа свинец-олово-теллур (СОТ).

Приемники ИК-излучения на основе СОТ не обладают такими недостатками КРТ-фотоприемников, как временная нестабильность параметров, связанная с внутренними миграциями в материале. Материал СОТ может быть получен более однородным, чем КРТ, поэтому преимущества СОТ наиболее ярко проявляются при изготовлении многоэлементных фотоприемников. Стоимость СОТ значительно (до 10 раз) ниже КРТ.

Однако, частотные свойства фотоприемников на основе СОТ значительно уступают приемникам на КРТ вследствие большой величины диэлектрической постоянной СОТ. Рабочая частота фотоприемников на основе СОТ составляет около 1 мГц, в то время, как фотоприемники на КРТ работают до частот порядка сотен мегагерц.

В настоящее время известно более 20 зарубежных фирм, выпускающих фотодиоды на основе СОТ. Ведущими в этой области являются фирмы SBRS, Barnes Eng., (США); Plessey (Англия); Atomica Tech. Phys. (ФРГ) и др.

Зарубежными фирмами выпускаются, в основном, фотодиоды, работающие в диапазоне от 2 до 14 мкм, при охлаждении фоточувствительного элемента до температуры 77-80°К.

Минимальные размеры ФЧЭ составляют 25 x 25 мкм, при зазоре порядка 10-25 мкм. Расположение ФЧЭ - линейка или матрица, с числом элементов до 110 (и более по спец. заказу).

Чувствительность фотодиодов на СОТ составляет 3-6 А/Вт при квантовом выходе 70-80%. Обнаружительная способность в максимуме спектральной характеристики достигает $5 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для лучших образцов.

Следует отметить определенные трудности в реализации параметров на фотоприемниках основе СОТ в составе аппаратуры (или ФПУ), т.к. они имеют сравнительно невысокое динамическое сопротивление и амперваттную чувствительность, а следовательно, и более низкий уровень собственных шумов, что требует применения высококачественных усилителей фотосигнала с уровнем собственных шумов меньше $1 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$.

Стоимость фотодиодов на основе СОТ составляет от 2000 до 6000\$ в зависимости от количества элементов, уровня фотоэлектрических параметров и конструкции приборов.

Основные параметры фотодиодов на СОТ приведены в таблице 11.

Таблица 11. Основные параметры охлаждаемых фотодиодов на основе СОТ, выпускаемых ведущими фирмами

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{фчэ}}$, мкм	Динами- ческое сопро- тивле- ние, $R_{\text{д}}$, кОм	Постоян- ная време- ни, τ , мкс	$S_{\text{элэч}}$, $\text{А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [$T_{\text{фв}}$, °K]	$D^*_{\text{элэч}} \cdot 10^{10}$, Вт^{-1} $1 \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы- изготовители
0,24 мм ²	60	2...25	10...11	до 150	0,05	1..2 [77°K]	до 2	Raythen Co.
0,025... 1 мм ²	60	2...13	10,7	20... 10000	0,1...1	2..4 [77°K]	1,5...3	SAT
0,025... 6 мм ²	30...60	5...12	10,6	—	0,02	5..6 [77°K]	до 4	Plessey Optoelectronics
от 0,1x0,1 до 1x1	60	5...10,2	10,0	150	0,5	2...3 [77°K]	2...3	Barnes Engineering Comp.
Ø0,35; Ø0,5; Ø0,7; Ø1,5; Ø2	60	6...11,5	11,0	50...100	0,5	2...3 [77°K]	1,5...2	Barnes Engineering Comp.
Ø0,35; Ø0,5; Ø0,7; Ø1,5; Ø2	60	6,5...13	10,6	15...20	0,25	2..3 [77°K]	0,5...1	Barnes Engineering Comp.
до Ø1,0	10	6,5...13	8	1500	0,02... 0,05	[4,2°K]	1,5...20	Barnes Engineering Comp.
до Ø1,0	10	7,5...15	9,8	5000... 10000	0,02... 0,05	[4,2°K]	1...15	Barnes Engineering Comp.
до Ø1,0	10	9...18	12,6	1500... 2000	0,02... 0,05	[4,2°K]	5...10	Barnes Engineering Comp.
от 0,0025 до 4 мм ²	60	6,5...12,5	9...11	0,4 Ом/см ²	0,5	5 [77°K]	2...3	Oniel GmbH

Фотоприемники на основе арсенида индия

Арсенид индия (InAs) является наиболее оптимальным полупроводниковым материалом для создания фотоприемников. Благодаря высокой подвижности носителей заряда InAs из него могут изготавливаться фотоприемники, основанные на большинстве известных физических эффектов: фотопроводимости, фотогальваническом и фотогальваномангнитном.

Известно около 20 зарубежных фирм выпускающих фотоприемники на основе арсенида индия. Подавляющее большинство фирм выпускает фотодиоды, работающие в диапазоне длин волн от 1 до 3,8 мкм, с максимумом спектральной характеристики 2,8. ...3,6 мкм.

Фотодиоды на основе арсенида индия, так же как и фоторезисторы на основе сернистого свинца оптимизированы на один из трех температурных режимов ФЧЭ: АТО, ИТО, ЛТО.

При уменьшении температуры охлаждения ФЧЭ увеличивается обнаружительная способность, чувствительность и постоянная времени фотодиода.

Технология изготовления фотодиодов на основе арсенида индия имеет много общего с технологией изготовления ФД на основе антимонида индия, что позволяет получать одно- и многоэлементные фотоприемники с произвольной геометрией ФЧЭ. Минимальный размер ФЧЭ составляет 75 x 75 мкм, максимальный 10 x 10 мм.

Обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектральной характеристики составляет $(3-10) \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приемников работающих в режиме «АТО», $(2-35) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для приемников работающих в режиме «ИТО», $(2-7) \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ для режима «ЛТО». Благодаря малой постоянной времени, высокой обнаружительной способности и возможности работать без источника смещения - фотодиоды на основе InAs конкурентоспособны по сравнению с фоторезисторами на основе PbS.

Цена фотодиодов на основе арсенида индия составляет от 175 до 1200\$, в зависимости от количества ФЧЭ и уровня фотоэлектрических параметров.[2, 25...27, 46].

Основные параметры некоторых типов фотодиодов на основе InAs приведены в табл. 1, 2 и 12.

Таблица 12. Основные параметры фотодиодов на основе InAs выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Угол зрения, град	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{фос}},$ мкм	Динамическое сопротивление, R_d , кОм	Постоянная времени, τ , мкс	$S_{\text{фос}},$ $\text{А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [$\Gamma_{\text{фос}}, ^\circ\text{К}$]	$D^+_{\text{фос}} \times 10^{10}$ $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \Gamma_{\text{фос}}^{-0,5}$	Ведущие фирмы- изготовители
5 x 5	—	0,9...3,1	2,8	—	1	2 [77°K]	40	Hamamatsu Corp.
Ø0,25	—	1,5...3,4	3,4	—	0,01	0,6 [195°K]	0,1	Judson Research
1,0 мм ²	—	1...3,2	3,1	30...60	0,7	1 [77°K]	40	Judson Infraed
Ø0,1	—	1...3,3	3,0	—	1	2 [300°K]	0,4	Barnes Engineering Corp.
от 0,0025... до 100 мм ²	—	1...3,8	3,6	—	0,5	1 [300°K]	0,03	Spectronics Inc.
от 0,0025... до 100 мм ²	—	1...3,3	3,2	—	0,5	1 [77°K]	30	Spectronics Inc.
от Ø0,5 до Ø2	180	1...3,0	3,0	до 100	1	1 [77°K]	40	SBRs
от 0,1... до 2,54 мм ²	—	2...3,8	3,5	0,03	1	[295°K]	0,06...0,1	Barnes Ing Corp. Electro Nuclear Lab. Filco Ford Corp. Texas Instr. Inc.
от Ø0,1... до Ø2,54 мм ²	60	2,5...3,4	3,2	до 50	1	[195°K]	20...35	Barnes Ing Corp. Electro Nuclear Lab. Filco Ford Corp. Texas Instr. Inc.
от Ø0,1... до Ø2,54 мм ²	60	1,8...3,8	3,1	до 500	0,5	[77°K]	40...70	Barnes Ing Corp. Electro Nuclear Lab. Filco Ford Corp. Texas Instr. Inc.

Фотоприемники на основе легированного германия и кремния

Добавление в кристалл германия или кремния примесей определенного типа создает примесные уровни вблизи валентной зоны либо зоны проводимости. Возбуждение электронов из примесных уровней в зону проводимости или дырок путем возбуждения электронов из валентной зоны в примесные уровни возбуждает явление фотопроводимости. Из большого числа примесей, которые могут образовывать уровни в запрещенном энергетическом зазоре, лишь некоторые находят практическое применение для изготовления фотоприемников.

Поскольку примесные уровни истощаются за счет тепловой ионизации, необходимо снижать температуру ФЧЭ из примесных материалов до 77 К или значительно ниже в соответствии с энергией ионизации примесей. Подбором типа примеси с подходящей энергией ионизации можно получать требуемое значение длинноволновой границы чувствительности фотоприемника.

Так как достижимые коэффициенты примесного поглощения излучения в германии и кремнии весьма малы (порядка $0,15 \text{ см}^{-1}$), то для изготовления фотоприемника требуется, чтобы толщина ФЧЭ в направлении действия излучения должна быть несколько сантиметров, однако, на практике используются ФЧЭ толщиной порядка 5-10 мм. При этом квантовая эффективность приемника составляет порядка 50%. Для увеличения квантовой эффективности заднюю поверхность ФЧЭ срезают под углом полного внутреннего отражения (для германия угол полного внутреннего отражения равен 14°).

Первые образцы фотоприемников на основе примесных кремния и германия были изготовлены более 40 лет тому назад.

Зарубежными фирмами на основе примесного германия и кремния выпускаются фоторезисторы предназначенные для работы в спектральном диапазоне от 2 до 120 мкм и более.

Выпуском фоторезисторов на основе легированного германия занимаются 35 зарубежных фирм, 10 фирм выпускают фоторезисторы на основе легированного кремния.

Фотоприемники на основе легированного германия

В настоящее время для изготовления фоторезисторов на основе примесного германия используется германий, легированный золотом, ртутью, кадмием, медью и цинком.

Фоторезисторы на основе германия легированного золотом (Ge:Au) предназначены для работы в диапазоне 1-6 мкм с $\lambda_{\text{макс}}$ лежащей, в районе 5 мкм при температуре ФЧЭ порядка 77°K.

Обнаружительная способность фоторезисторов на основе германия легированного золотом в максимуме спектральной характеристики составляет от $(1,5 \dots 10) \cdot 10^9 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$. При снижении температуры охлаждения ФЧЭ до 60°K обнаружительная способность фоторезисторов возрастает до $2 \cdot 10 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$.

Зарубежными фирмами выпускаются как одноэлементные, так и многоэлементные фоторезисторы с минимальными размерами фоточувствительного элемента от 75 x 75 мкм, с зазором между элементами порядка 50 мкм.

Цена одноэлементного фоторезистора составляет порядка 2000\$ [25, 26].

Фоторезисторы на основе германия легированного ртутью (Ge:Hg) предназначены для работы в диапазоне 2-14 мкм. с $\lambda_{\text{макс}}$ порядка 10-11 мкм при температуре охлаждения ФЧЭ ниже 30°K. Номинальное значение температуры охлаждения фоточувствительного элемента составляет 4-5°K.

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики составляет $(1 \dots 2) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре ФЧЭ 25-27°K.

Минимальные размеры фоточувствительных элементов 75 x 75 мкм, при зазоре между ними порядка 50 мкм. Количество ФЧЭ достигает 60 в одном модуле, и более 200 в одном фотоприемнике, изготовленном по специальному заказу.

Цена одноэлементного фоторезистора на основе германия легированного ртутью составляет порядка 3000\$ [2, 16, 25, 26,27]

Фоторезисторы на основе германия легированного кадмием (Ge:Cd) предназначены для работы в диапазоне от 2 до 23 мкм, с $\lambda_{\text{макс}}$ порядка 16-19 мкм при температуре охлаждения фоточувствительного элемента ниже 24°K. Номинальная температура охлаждения ФчЭ составляет 4 – 5°K.

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики составляет $(2...3) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре ФчЭ, равной 4,2 -5°K.

Минимальный размер фоточувствительного элемента составляет порядка 75 x 75 мкм. Зазор между элементами порядка 50 мкм. при изготовлении многоэлементного фоторезистора.

Цена одноэлементного фоторезистора составляет порядка 3000\$ [25-26].

Фоторезисторы на основе германия легированного медью (Ge:Cu) предназначены для работы в диапазоне от 2 до 30 мкм, с $\lambda_{\text{макс}}$ 21-23 мкм при температуре охлаждения фоточувствительного элемента ниже 14°K. Номинальная температура охлаждения.ФчЭ составляет 4 – 5°K.

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики составляет $(1...3) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ при температуре ФчЭ , равной 4,2-5 °K.

Минимальный размер ФчЭ составляет 75 x 75 мкм.

Цена одноэлементного фоторезистора составляет 2500-3000\$.

Фоторезисторы на основе германия легированного цинком (Ge:Zn) выпускаются для работы в диапазоне 20-40 мкм., с $\lambda_{\text{макс}}$ 36-37 мкм, при температуре ФчЭ - 4,2 °K.

Обнаружительная способность фоторезисторов в максимуме спектральной характеристики $(1...2) \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$

Минимальный размер ФчЭ - 75 x 75 мкм.

Цена одноэлементного фоторезистора составляет порядка 3300\$.

Основные параметры некоторых типов фоторезисторов на основе легированного германия приведены в табл. 2 и 13 [2, 16, 25-27, 42, 46].

Таблица 13. Основные параметры фоторезисторов на основе легированного германия, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФчЭ, мм	Материал ФчЭ	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{макс}}$, мкм	Темновое сопротивление, R_T , кОм	Постоянная времени, нс	$S_{\lambda_{\text{макс}}} \times 10^3$, $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$ [Т _{ФчЭ} , К]	$D^*_{\lambda_{\text{макс}}} \times 10^{10}$, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{0,5}$	Ведущие фирмы-производители
от 0,08 до 19,6 мм ²	Ge: Au	1,8...11	5	1...10 кОм/кВ	1...2	0,01...0,02 [77]	0,15...0,5	SBS
4 мм ²	Ge: Au	2...11	6	—	1000	4 [77]	0,4	Barnes Ing.
0,5...3 мм ²	Ge: Au	1,5...11 (2...6)	5	250	10	5...10 [77]	0,3...0,5	Advanced Kinetics
до 3,4 мм ²	Ge: Au	2...11	5	100	500	1 [77]	0,6	RAY
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3; Ø5	Ge: Hg	2...13	10,6	20...500 кОм/кВ	10...100	0,6...3 [4,2...27]	1...2	SBS
1x1	Ge: Hg	6...10	10	—	10	10 [4,2]	2	Advanced Kinetics
до 3,4 мм ²	Ge: Hg	2...25	10...11	200	50	10 [4,2...25]	1,5	RAY
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3; Ø5	Ge: Cu	2...27	21	200...500	10...100	0,6...3 [4,2]	1...5	SBS
1x1	Ge: Cu	10...20	20	—	0,1	10 [4,2]	2	Advanced Kinetics
6...16 мм ²	Ge: Cu	2...25	15	20...120	1000	[5]	1,0	Mullard
от 0,01 до 10 мм ²	Ge: Cd	5...23	22	100	10...1000	[8...20]	3	AESC
Ø0,5; Ø1; Ø2	Ge: Cd	5...24	18	500	—	[4,2]	2	SBS
Ø0,5; Ø1; Ø2	Ge: Zn	до 40	37	20...500 кОм/кВ	10...100	0,1...0,5 [4,2]	1...2	SBS

Фотоприемники на основе легированного кремния

В настоящее время для изготовления фоторезисторов на основе примесного кремния используется кремний, легированный индием, галлием, алюминием, сурьмой, мышьяком и фосфором «Примесный» кремний является перспективным материалом для изготовления фоточувствительных приборов с зарядовой связью и (монолитных формирователей сигналов изображения).

Фоторезисторы на основе кремния легированного индием (Si:In) предназначены для работы в диапазоне 2...7,5 мкм, с $\lambda_{\max}$, порядка 6 мкм при температуре ФЧЭ, равной 4,2 К.

Минимальный размер ФЧЭ составляет 100 х 100 мкм.

Фоторезисторы на основе кремния легированного галлием (Si:Ga) предназначены для работы в диапазоне 4-17 мкм, с $\lambda_{\max}$, порядка 15 - 16 мкм. при температуре ФЧЭ ниже 25°К. Номинальная температура фоточувствительного элемента 18°К.

Минимальный размер ФЧЭ составляет 100 х 100 мкм.

Фоторезисторы на основе кремния легированного сурьмой (Si:Sb) предназначены для работы в диапазоне 12-23 мкм, с $\lambda_{\max}$, порядка 20 мкм. при температуре ФЧЭ, равной 4,2°К.

Минимальный размер ФЧЭ составляет 100 х 100 мкм.

Фоторезисторы на основе кремния легированного мышьяком (Si:As) выпускаются для работы в диапазоне 2-24 мкм, с $\lambda_{\max}$, порядка 22 мкм, при температуре ФЧЭ ниже 20°К. Номинальная температура фоточувствительного элемента 4,2°К.

Минимальный размер фоточувствительного элемента составляет 100 х 100 мкм, при зазоре до 25 мкм между ФЧЭ. Количество элементов в линейке порядка 30.

Цена одноэлементного фоторезистора на основе легированного кремния примерно 2000 – 4000\$ в зависимости от конструкции и параметров фотоприемника. [2, 16, 25-27, 42, 46].

Основные параметры фоторезисторов на основе легированного кремния приведены в табл. 1 и 14.

Таблица 14. Основные параметры фоторезисторов на основе легированного кремния, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Материал ФЧЭ	Диапазон спектр. чувствит., мкм	$\lambda_{\text{чакс}}$, мкм	Темновое сопротивление, R_T , кОм	Постоянная времени, ис	$S_{\lambda_{\text{чакс}}} \times 10^3$, $\frac{\text{В}^* \text{Вт}^{-1}}{[\text{ТФчЭ}, \text{К}]}$	$D^*_{\lambda_{\text{чакс}}} \times 10^{10}$, $\frac{\text{Вт}^{-1} * \text{см}^2 * \text{Гц}^{0,5}}{\text{В}}$	Ведущие фирмы- изготовители
от 0,01 до 10 мм ²	Si:Al	4...18	17	до 100	10...1000	[20]	2	AESC
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3	Si:As	2...25	23,5	10...100 кОм/кВ	10...100	1...5 А/Вт [4,2...12]	2...3	SBRS
от 0,1 до 10 мм ²	Si:As	6...25	23	до 100	–	[4,2...12]		AESC
от 0,01 до 10 мм ²	Si:Bi	4...17	16	до 100	10...1000	[20]	1	AESC
от 0,01 до 10 мм ²	Si:Cd	4...17	15	до 100	10...1000	[18]	2	AESC
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3	Si:Ga	2...17	15,5	10...100 кОм/кВ	10...100	1...3 А/Вт [4,2...18]	1...3	SBRS
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3	Si:Sb	2...29	26	10...100 кОм/кВ	10...100	1...5 А/Вт [4,2...10]	1...2	SBRS
Ø0,5; Ø1; Ø2; Ø3	Si:Sb	6...33	28	до 1000	–	[4,2]	1	AESC
от 0,01 до 10 мм ²	Si:Zn	2...7,5	6	до 1000	10...1000	[50]	1	AESC

Многодиапазонные фотоприемники

В последние годы многие зарубежные фирмы проявляют заметный интерес к разработке и выпуску т.н. многодиапазонных (многоцветных) фотоприемников. Такие приемники находят широкое применение в тепловизионных ИК-системах, в системах раннего обнаружения пусков баллистических ракет, тепловых головках самонаведения и т.п. Особое значение в этом случае имеет повышенная селективность и высокая помехозащищенность многоспектральных систем, позволяющих обнаруживать цели на фоне помех в широком спектральном диапазоне.

В общем виде, многодиапазонные фотоприемники представляют собой приборы, в которых объединены два и более фотоприемников, работающих в различных спектральных диапазонах.

Самый простей способ - расположен рядом фоточувствительных элементов различных фотоприемников или линеек. Однако, более широко применяется объединение двух или более фоточувствительных элементов в т.н. «сэндвич»-структуру, двухслойную или многослойную. При этом фоточувствительные элементы, работающие в коротковолновой части спектра располагаются в верхних или средних слоях, и служат фильтрами для нижних слоев, способных воспринимать более длинноволновое излучение. В «сэндвич»-структуры объединяются, как одноэлементные, так и линейные и матричные (двумерные) структуры.

Спектральный диапазон чувствительности многоцветных фотоприемников зависит от используемых полупроводниковых материалов и может простирается, в сложных многодиапазонных устройствах, от видимого до дальнего ИК-диапазона.

Однако, наибольший интерес представляют фотоприемники, работающие в спектральных диапазонах 1-3,3-5 и 8-14 мкм, соответствующих окнам прозрачности атмосферы. Поэтому, наиболее перспективными материалами для многодиапазонных фотоприемников являются такие, как кремний, германий, сульфид и селенид свинца, антимонид индия, тройные соединения кадмий-ртуть-теллур, свинец-олово-теллур.

В настоящее время известно более 20-ти зарубежных фирм, разрабатывающих и выпускающих многодиапазонные фотоприемники. Например, фирма ENL (США) выпускает двухцветные фотоприемники на основе пары п/п материалов: кремний сернистый свинец, а фирма Infrared Industrier (США) изготавливает два типа фотоприемников на основе пар: кремний+сульфид свинца и кремний+селенид свинца.

Однако, наиболее перспективным материалом для создания многодиапазонных фотоприемников считается КРТ (кадмий-ртуть-теллур), спектральный диапазон чувствительности которого зависит от состава и может изменяться в пределах от 0,8 до 40 мкм. Промышленными фирмами США начат выпуск серийных образцов двухцветных фотоприемников на основе пары антимонид индия + КРТ фирмой Barnes Eng. и фирмой Infrared Industrier а фирмой Judson Inf. начат выпуск фотоприемников на основе КРТ разного состава.

Конкурентным материалом для замены дорогостоящего и трудоемкого материала КРТ является СОТ (свинец-олово-теллур), использование которого позволит получать недорогие многодиапазонные структуры для многоэлементных многоцветных фотоприемников. В этом направлении ведущими фирмами ведутся специальные работы. Фирмой Barnes Eng. (США) осуществляется промышленный выпуск двухдиапазонных фотоприемников на основе пары антимонид индия + СОТ.

Определенный интерес представляет использование для изготовления многодиапазонных фотоприемников примесного кремния, спектральной чувствительностью которого можно управлять специальным подбором примесей. Однако, для охлаждения такого приемника требуется глубокое охлаждение (до 4 – 20°K) фоточувствительного элемента.

В табл. 15 приведены типовые параметры многодиапазонных фотоприемников, выпускаемых ведущими фирмами [11,26, 27,46].

ТИПОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ
МНОГОДИАПАЗОННЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ
ВЫПУСКАЕМЫХ ВЕДУЩИМИ ЗАРУБЕЖНЫМИ ФИРМАМИ

Таблица 15

Материал ФЧЭ	Количество спектральных диапазонов зон	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм (λ_m , мкм)	Размер ФЧЭ, мм ²	Количество ФЧЭ и их расположение	Угол зрения, град	Температура ФЧЭ, К	Постоянная времени τ , мкс (Сп, пф)	Чувствительность S_λ , А/Вт (КВ.ЭФ., %)	Обнаружительная способность D^* , Вт ⁻¹ Гц ^{1/2} см	Фирмы изготовители
InSb PbSnTe	2	1,0-5 5-15	4,5 2,0	2 сэндвич		70-80			$\geq 1,7 \times 10^{10}$ (500; 900; 1) $\geq 4,1 \times 10^9$ (500; 900; 1)	Barnes Eng. Co. [BE]
Si PbS	2	0,37-2,9	4,0 мм 25 4,0 мм 25	2		200-330			$\geq 1,0 \times 10^{12}$ (Si, ФА, λ_m) $\geq 3,5 \times 10^{11}$ (PbS, ФР, λ_m)	Electro-Nuclear Laboratory [ENL]
InSb CdHgTe	2	1,0-5,5 5,5-12-14	1,0 4,0	2 сэндвич	60	77	< 1,0 < 30		$5 \dots 8 \times 10^{10}$ (λ_m) $1,5 \dots 2 \times 10^{10}$ (λ_m)	Infrared Associates [IRA]
Si PbS	2	0,35-1,13 1,1-3,0	5,1 5,1	2		300	(100-250 пф) (200-250 пф)		$\geq 1,0 \times 10^{13}$ (0,9; 100; 1) $\geq 2,5 \times 10^{10}$ (λ_m ; 100; 1)	Infrared Industries [IR]
Si PbSe	2	0,35-1,13 1,1-4,7	5,1 5,1	2		300	(100-250 пф) (200-250 пф)		$\geq 1,0 \times 10^{13}$ (0,9; 100; 1) $\geq 4,0 \times 10^7$ (λ_m ; 100; 1)	— " — " —
Ge InSb	2	0,5-5,5 (λ_m , -4,4) (λ_m , -4,4)		2 сэндвич	120	80		0,65 (λ_m , Ge)	$\geq 4,8 \times 10^{11}$ (λ_m , InSb)	Aeronutronic Ford
CdHgTe	2	до 8,8 9,6-11,1		2 сэндвич		95			$\geq 3,9 \times 10^9$ (λ_m) $\geq 9,5 \times 10^9$ (λ_m)	Honeywell Radiation Center
CdHgTe	3	до 9,1 до 10,8 до 13,8		3	65	78			$\geq 2,0 \times 10^7$ (λ_m) $\geq 5,0 \times 10^8$ (λ_m) $\geq 2,0 \times 10^3$ (λ_m)	— " — " —
CdHgTe	4	8-10; 10-12; 12-16; 16-18		4	60	78		(47-80 %)	$\geq 1,0 \times 10^{11}$ (λ_m)	— " — " —
PbTe PbSnTe	2	3-5 (λ_m -4,6) 8-14 (λ_m -9,8)		6+6 (8-кратная линейка)	180	80		(50 %) (73 %)	$\geq 1,0 \times 10^{10}$ (λ_m) $\geq 2,2 \times 10^{10}$ (λ_m)	SBRC

Тепловые приемники излучения

В связи с появлением в последние годы новых материалов и технологических процессов появились возможности создания тепловых приемников излучения (ТПИ) с высоким уровнем фотоэлектрических параметров и характеристик.

Основные преимущества ТПИ - это работоспособность в широком диапазоне электромагнитного спектра от долей мкм - до тысячи мкм без охлаждения чувствительного элемента и невысокая стоимость этих приборов в промышленном производстве.

Известно более 20 зарубежных фирм выпускающих тепловые приемники излучения. Наибольшее распространение получили два вида ТПИ - термоэлектрические пленочные приемники и пироэлектрические приемники излучения, последние иногда называют ППИ.

Термоэлектрические приемники излучения представляют собой миниатюрные термопары, размещенные в специальном корпусе, имеющем прозрачное для рабочей области спектра входное окно. В качестве исходных материалов для изготовления термоэлектрических ТПИ применяют бериллий, медь, серебро, сурьму, марганец, или их соединения и сплавы.

Минимальные размеры чувствительных элементов термоэлектрических приемников излучения составляют 0,25 x 0,25 мм, максимальные до 25,4 x 25,4 мм. Максимальное количество элементов в одном ТПИ до 120.

Спектральный диапазон работы термоэлектрических ПИ составляет от 0,2 до 200 мкм. Обнаружительная способность лучших промышленных образцов достигает $(1...4,9) \cdot 10^8 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5} (500^\circ\text{K})$, вольтовая чувствительность составляет от 1 до 30 $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$, сопротивление чувствительного элемента от 2 Ом до 80 ком. Следует отметить довольно значительную инерционность термоэлектрических ПИ, постоянная времени этих приемников составляет от 5 до 2000 мс. Цена термоэлектрических приемников излучения составляет от 100 до 300 \$. Основные характеристики некоторых типов термоэлектрических приемников излучения, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, приведены в табл. 16.

Таблица 16. Основные характеристики некоторых типов термоэлектрических приемников излучения, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами.

Размеры ФЧЭ, мм	Диапа- зон спектр. чувст- витель- ности, мкм	Темно- вое сопро- тивле- ние, R_T , кОм	Посто- янная време- ни, мс	$S_{\lambda_{\text{эфф}}}$ $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$, ($F_{\lambda_{\text{эфф}}}$)	ЭМШ, $\times 10^{-10}$, $\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$	$D^*_{\lambda_{\text{эфф}}}$ $\times 10^8$, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$ ($T_{\text{эфф}} = 500^\circ\text{K}$)	Диа- зон рабочих темпера- тур, $^\circ\text{C}$	Ведущие фирмы- изготови- тели
от $\varnothing 1,0$ до $\varnothing 6$ и от 0,2x0,6 до 6x6	0,2...30	1...40	20... 100	1...15 (10 Гц)	1... 22	0,1...2	-65...+70	Sensors
1x1 (до 6 эл- ов)	0,6...35	8	80	15 (пост. ток)	7,7	1,3	-20...+80	Barnes Ing.
1...4 мм ²	0,2...40	—	4,5... 30	15...31 (пост. ток)	—	1...5	—	Dexter Reseach Cen.
2,25...28 мм ²	0,2...200	—	—	3...34 (пост. ток)	—	1...2	—	Oriel
0,75...4 мм ²	0,35...40	—	30... 60	16...31 (пост. ток)	—	2...5	—	Hariba Instrument
1x1	0,3...25	—	80	10 (пост. ток)	—	1...2	0...+80	RTC

Пироэлектрические приемников излучения.

Принцип действия пироэлектрических приемников излучения (ППИ) основан на пироэлектрическом эффекте, который заключается в том, что при изменении температуры пироактивного кристалла изменяется его поляризации, что приводит к изменению физических свойств и состояния пироэлектрика: заряда, емкости, сопротивления и т.д.

В качестве материалов чувствительных элементов ППИ применяют специальную керамику (ЦТС), триглициносульфат, ниобат стронция бария, поливинил фторид, поливинилиден фторид, танталат лития, титанат цирконат свинца, сульфат лития, ниобат лития и др. материалы.

Пироэлектрический чувствительный элемент размещается в специальном корпусе, имеющем входное окно. Минимальные размеры чувствительного элемента пироэлектрического приемника составляют 0,5 x 0,5 мм, максимальные до 800 мм². Максимальное количество чувствительных элементов в одном приемнике достигает 128.

Спектральный диапазон работы пироэлектрических приемников излучения составляет от 0,001 до 1000 мкм, в зависимости от материала чувствительного элемента и материала входного окна приемника. Обнаружительная способность лучших промышленных образцов пироэлектрических приемников достигает $(2 - 4) \cdot 10 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{0,5} (500^\circ\text{K})$, чувствительность приборов составляет от 1 до 100 В*Вт⁻¹. Постоянная времени ППИ - от 0,5 нс до 100 мкс.

Следует отметить высокое сопротивление чувствительных элементов ППИ, составляющее от 10⁸ до 10¹⁰ Ом, что затрудняет их использование без принятия специальных мер. Наиболее эффективным является введение в состав пироэлектрического приемника излучения специального согласующего каскада или усилителя на полевом транзисторе, т.е. по-существу, изготовление так называемых тепловых приемных устройств - ТПУ. Чувствительность ТПУ на основе пироэлектрических приемников излучения составляет 10⁴ - 10⁵ В*Вт⁻¹.

Цена одноэлементных пироприемников и ТПУ составляет 100-130\$, многоэлементных и матричных приборов от 725 до 5000 долларов. [1, 2, 26, 27, 45 - 47, 43].

Основные характеристики некоторых типов пироэлектрических приемников излучения и ТПУ, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами приведены в табл. 17.

Таблица 17. Основные характеристики некоторых типов пирозлектрических приемников излучения и ТПУ, выпускаемых ведущими фирмами.

Размеры фчЭ, мм	Диапазон спектр. чувствит., мкм	Постоян- ная времена, с	$S_{\lambda \max}, \times 10^3$, $\text{В} \cdot \text{ВТ}^{-1}$, ($F_{\text{Габ}}$)	ЭМШ, $\times 10^{-10}$, $\text{ВТ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$	$D^*_{\lambda \max} \times 10^8$, $\text{ВТ}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ ($T_{\text{АЧ}} = 500^\circ \text{К}$)	Диапазон рабочих температур, $^\circ \text{С}$	Ведущие фирмы-изготовители
от $\varnothing 1$ до $\varnothing 35$	0,001...1000	0,005...0,5	0,1...50 (15 Гц)	20...60	—	$-55 \dots +70$	Moletron
$\varnothing 1,0$ (от 10 до 128 элементов)	0,001...1000	0,005	—	1,25	—	$-55 \dots +80$	Moletron
0,5...4 мм^2	0...400	0,01...1	0,3...50 (20 Гц)	10...50	0,1...2	$-55 \dots +100$	Laser Pression
0,2 мм^2 (квадрат)	0,001...300	0,1	4 (10 Гц)	—	—	$-40 \dots +85$	Moletron
$\varnothing 1$ (до 128 элементов)	0,4...400	0,175	$(2 \times 10^{-7} \text{ А/ВТ})$	1000	0,5	$-40 \dots +85$	Laser Pression
2...4 мм^2	0,3...25	—	40 (10 Гц)	—	1...2	—	Pressey Optoelectronics
2...4 мм^2	1...14	—	0,75 (10 Гц)	—	0,46...0,66	—	Pressey Optoelectronics
от 0,5 до 10 2x2 (5 и 10 элементов)	2...20	0,15	0,4...2 (10 Гц)	1,25	2...4	$-10 \dots +70$	Barnes Ing.
от 0,5 до 10 2x2 и 3x1	2...35	0,01	0,25...100 (10 Гц)	5...25	1...6	$-10 \dots +40$	RTC
2x2	0,2...35	—	0,7...100 (10 Гц)	9...20	до 1	$-40 \dots +70$	Oniel
от $\varnothing 1$ до $\varnothing 5$	2,5...30	—	до 10 (10 Гц)	—	до 1	$-20 \dots +55$	NEW England Research Cen.
4 мм^2	1...25	0,1	0,07...0,275 (10 Гц)	—	1...2,2	—	Elec Instrument

Фотоприемные устройства

Термин фотоприемное устройство (ФПУ) применительно к фотоэлектроническим приемникам излучения возник сравнительно недавно (10-15 лет назад) и начал применяться, в основном, для определения конструктивно объединенных фотоприемника и предварительного усилителя фотосигнала. В свою очередь, это объединение диктовалось стремлением максимально сблизить фотоприемник и предусилитель, сводя к минимуму шумы схемы обработки сигнала на уровне выходных параметров фотоприемника.

Фотоприемное устройство не только обеспечивает преобразование энергии излучения в изменение физических параметров полупроводникового фоточувствительного элемента, но и обеспечивает оптимальное согласование ФЧЭ с входом электронного тракта аппаратуры.

Фотоприемное устройство, как правило, обеспечивает создание и поддержание оптимальных условий и режимов работы ФЧЭ с целью реализации высоких фотоэлектрических параметров непосредственно в аппаратуре.

В иностранной литературе не существует точного аналога понятию ФПУ. В иностранной литературе встречаются термины близкие по значению к понятию фотоприемного устройства. Простейшим аналогом ФПУ можно считать «Photodarlington» прибор, содержащий фототранзистор и транзистор, включенные по схеме Дарлингтона. В иностранной литературе встречаются также такие термины, как «Photocircuit» - фоточувствительная интегральная схема; «Photodiode/operational amplifier combination» - устройство, содержащее фотодиод и операционный усилитель; «Photo-detector Modules» фотодетекторный модуль и т.д.

Термин «Sensor» который часто ошибочно переводят на русский язык как ФПУ, относится к гораздо более широкому понятию и определяет приемную часть оптико-электронной аппаратуры, обычно ту её часть, которая представляет единый блок, вынесенный наружу или установленный за соответствующим окном или обтекателем, например, на летательном аппарате. Такой блок обычно включает оптическую систему, систему сканирования, фотоприемник и существенную часть схемы обработки фотосигнала [28].

Фотоприемное устройство по буквальному значению этих слов, также намного шире термина ФПУ. Под фотоприемным устройством, в буквальном смысле, вполне можно понимать значительную часть оптико-электронного прибора или даже весь прибор целиком. Однако в практике конструирования сравнительно простых фотоприемников за термином ФПУ закрепилось более узкое понятие. По принятому в СССР определению (ГОСТ 22899-78) ФПУ - это устройство, состоящее из электрически соединенных полупроводникового фотоэлектрического приемника излучения и схемы предварительной обработки сигнала, объединенных в единую конструкцию. При этом под схемой обработки сигнала понимают электронную схему, обеспечивающую приведение фотоэлектрического сигнала к заданному уровню,

В состав фотоприемного устройства, кроме двух обязательных элементов (фотоприемника и усилителя) могут входить и другие устройства, выполняющие дополнительные функции. Например, функции охлаждения или термостатирования ФЧЭ, стабилизации рабочей точки фотодиода по напряжению смещения или рабочего тока лавинного фотодиода; автоматической регулировки чувствительности; коммутации каналов многоканальных ФПУ и т.д. и т.п. [35].

ФПУ в отличие от дискретных фотоприемников может содержать определенную часть оптических элементов и схемы обработки сигнала, принадлежавших ранее оптико-электронной аппаратуре в целом, т.е. ФПУ может выполнять часть функций ранее выполнявшихся узлами аппаратуры.

В настоящее время наблюдается ярко выраженная тенденция к расширению состава и функциональному усложнению ФПУ, которым передается все больше функций собственно аппаратуры.

Сложные фотоприемные устройства могут содержать дополнительные элементы, обеспечивающие спектральную или частотную селекцию обозреваемого пространства; электронное или оптическое сканирование изображения; смешивание, суммирование, нормирование и дискриминацию фотосигнала, а также другие элементы, выполняющие другие функции.

Многие дополнительные функции в сложных фотоприемных устройствах выполняются, т.н. схемами «электронного обрамления», содержащими согласующие и усилительные устройства, коммутаторы, фильтры, сдвиговые регистры, вторичные источники питания, генераторы тактовых импульсов, формирователи, распределители, схемы сравнения и т.п., выполненные в микроэлектронном исполнении, расположенные в непосредственной близости от ф.ч.э. или на одном кристалле с фоточувствительным элементом.

В качестве примера построения сложного фотоприемного устройства можно привести конструкцию координатора фирмы Westenghouse Ectetz. Corp. (США), который содержит многоэлементный (10 x 10 элементов) фоторезистор на основе сернистого свинца с мозаичным расположением фоточувствительных элементов; микроминиатюрные усилители фотосигнала, выполненные в виде полупроводниковых ИС; усилители постоянного тока, коммутаторы, устройство синхронизации; вторичный источник питания; модулятор излучения торсионного типа; зеркальный объектив и другие элементы, составляющие единую конструкцию прибора. Вес прибора 43 кг. [28]

В настоящее время известно более 140 зарубежных фирм, выпускающих фотоприемные устройства.

Фотоприемные устройства на основе кремниевых фотоприемников выпускают около 90 фирм, на основе фотоприемников из антимонида индия - более 10 фирм, на основе фотоприемников из КРТ и СОТ более 20 фирм, а 4 фирмы выпускают ФПУ на основе фотоприемников из легированного германия. Известно более 15 фирм выпускающих фотоприемные устройства с применением ПЗС и ПЗИ структур.

В открытой зарубежной печати, в основном, имеются сведения о простых фотоприемных устройствах, изготовленных по типу «фотоприемник-предусилитель». По такому же типу изготавливаются и многоканальные фотоприемные устройства.

Основные фотоэлектрические параметры фотоприемных устройств, как правило, определяются параметрами используемых фотоприемников и применяемого усилителя (усилителя фотосигнала).

Современные высококачественные фотоприемные устройства обеспечивают полную реализацию параметров используемых фотоприемников.

Основные параметры некоторых типов ФПУ выпускаемых ведущими зарубежными фирмами приведены в табл. 18. [26-28,46].

Таблица 18. Основные характеристики некоторых типов фотоприемных устройств, выпускаемых ведущими фирмами.

Состав и исполнение электронного тракта	Размеры фчЭ, мм	Рабочая длина волны, мм	Максимальная рабочая частота, МГц	ЭМШ, Вт·Гц ^{-1/2}	S _{эмш} , В·Вт ⁻¹ , (F _{раб})	D* _{эмш} , Вт ⁻¹ ·см ² ·Гц ^{0,5} (T _{эл} =500°K)	Ведущие фирмы-изготовители
Si p-n фотодиод; ОУ фотосигнала; полупроводниковая ИС	5,1 мм 100 мм ²	0,9 0,9 1,6	20 Гц 1,0 1,0	(1,1...93)*10 ⁻¹² (2,2...220)*10 ⁻⁹ (8,6...700)*10 ⁻⁹	9*10 ⁷ 4,7*10 ³ 1,2*10 ³	(0,1...2)*10 ¹² (0,05...1)*10 ⁸ (0,14...2,5)*10 ⁷	EGG
Si p-i-n фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	5,1 мм ²	0,9 1,6	40 18...100	9,5*10 ⁻¹² 5,9*10 ⁻¹¹	3*10 ⁴ 1,2*10 ⁴	2,4*10 ¹⁰ 3,8*10 ⁹	EGG
Si p-i-n фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	5,1 мм ²	0,9 1,6	1...100 1...100	2,7*10 ⁻⁹ (2,9...10)*10 ⁻⁹	(1...40)*10 ³ (0,7...8,3)*10 ³	(1,2...7)*10 ⁷ (0,9...5)*10 ⁷	Meret, CPL
Si p-i-n фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	1 мм 4,5 мм ²	0,9 1,6	1...100 1...100	2,7*10 ⁻⁹ (2,9...10)*10 ⁻⁹	(1...40)*10 ³ (0,7...8,3)*10 ³	(1,2...7)*10 ⁷ (0,9...5)*10 ⁷	Meret, CPL, RCA
Si p-i-n фотодиод; 4-х канальный усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	0,24 мм ² (4 элемента)	1,6	50 нс	8*10 ⁻¹²	—	—	Centronics
KPT фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	—	10,6	40...50	2*10 ⁻¹¹	—	—	Honeywell Radiation Ctr.
Si p-n фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	Ø5,9; Ø25,9	0,4...1,2	0,004...0,04	(2...8)*10 ⁻¹³	2,2*10 ⁴	—	Infrared Photomatrix
Si лавинный фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	от Ø0,1 до Ø2,5	0,55...1,125	до 60	2*10 ⁻¹³	8,2*10 ⁵ (0,9 мкс)	—	Genton
Si p-n фотодиод; усилитель фотосигнала; полупроводниковая ИС	0,8 мм ²	0,4...1,4	до 50	5*10 ⁻¹⁴	3*10 ⁵ (0,9 мкс)	—	RCA, Elec. Components

Предусилители для фотоприемников

Зарубежными фирмами выпускается большое число предусилителей предназначенных для работы совместно с фотоприемниками на основе различных полупроводниковых материалов. [21].

Известно более десятка фирм выпускающих предусилители. Это, как правило, фирмы выпускающие фотоприемники. Фирмы, выпускающие ФПУ также выпускают предусилители, но их каталоги, обычно, не содержат сведений о применяемых предусилителях.

Конструктивное оформление предусилителей весьма разнообразное, фирма выпускают автономные и модульные предусилители, и предусилители выполненные в виде гибридных или монолитных микросхем или микросборок, что позволяет использовать их не только в составе фотоприемных устройств, но и, очевидно, в составе измерительных установок в качестве входных измерительных усилителей.

Имеющиеся в технической литературе и фирменных каталогах сведения о качестве предусилителей показывают, что подавляющее большинство предусилителей реализуют высокие фотоэлектрические параметры фотоприемников, для усиления сигналов которых они предназначены.

Уровень собственных шумов приведенных ко входу предусилителей составляет от 0,5 до 25 нВ*Гц^{1/2}, полоса пропускания предусилителей лежит в пределах от единиц герц до 15 мегагерц, при коэффициенте усиления порядка 20 - 100 дБ.

Цена одноканальных предусилителей составляет от единиц долларов для усилителей, в микросхемном исполнении, до сотен долларов для предусилителей в модульном и автономном исполнении. [21,42].

Основные параметры предусилителей, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, приведены в табл. 19.

Таблица 19

Основные параметры предусилителей для фотоприемников, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами

N	Уровень шума [дБ·Гц ^{-1/2}] Фактор шума (дБ)	Условия измерения (R_p, f_{max}) $R_p = 100 \text{ Ом}$	Рабочая частота [Гц] $1 \div 10^3 \div 10^4 \div 10^5$	Коэффициент усиления [дБ]	Габаритные размеры [мм] (исполнение)	Фотоприемник и материал	Вед. фирмы, изготовители
1	1,5 (<3)		$1 \div 10^3 \div 10^4 \div 10^5$	40	$63 \times 63 \times 25$	ФД- ZnAs , ZnSb , CdHgTe , SnPbTe , Ge ФР- ZnAs , $\text{Ge} \div \text{As}$, $\text{Ge} \div \text{Hg}$, $\text{Ge} \div \text{Cd}$, $\text{Ge} \div \text{Ga}$, $\text{Ge} \div \text{Zn}$	Vacuum Engineering (США)
2	(<3)		$1 \div 3 \times 10^3$	20	$63 \times 63 \times 25$	ФД- Si , GeAs ФР- Si , PbS , PbSe , $\text{Si} \div \text{Sb}$	" " " "
3	(<3)		$1 \div 5 \times 10^3$	20	$63 \times 63 \times 25$	" " " "	" " " "
4	1,1	$R_p = 0$; $\Delta f = 15 \text{ МГц}$	$1,5 \times 10^7$	50	(ИС)	ФР- CdHgTe	Fazzanti (Англия)
5	0,5	$R_p = 0$; $f = 1 \text{ МГц}$		50-66	$90 \times 63 \times 25$	ФР- CdHgTe	Honeywell (США)
6	2,1	$R_p = 500 \text{ Ом}$; $f = 1 \text{ МГц}$	$10 \div 5 \times 10^3$	69 (тип.)	(ИС)	ФР- CdHgTe	" " " "
7	0,7 (2)	$R_p = 50 \text{ Ом}$	$0 \div 10^3$ $20 \div 10^3$ $20 \div 10^3$	40 30 40	$50 \times 50 \times 25$ " " " "	ФР- CdHgTe	Infrared Associates (США)
8	(2)	$R_p = 50 \text{ Ом}$ 1000 МОм 100 Ом	$20 \div 2 \times 10^4$ $20 \div 1 \times 10^4$ $10 \div 10^4$	40 40 20	$50 \times 50 \times 25$ " " " "	ФР- ZnAs	Judson Infrared (США)
9	(1)	$R_p = 1 \text{ КОм}$	$10 \div 10^4$ $10 \div 10^4$	40 20	$50 \times 50 \times 25$	ФР- Ge	" " " "
10	0,9	$R_p = 500 \text{ Ом}$	—	26	$50 \times 50 \times 25$	ФР- CdHgTe	Plessey (Англия)
11	0,8	$R_p = 50 \text{ Ом}$; $f = 6,5 \text{ МГц}$	$90 \div 6,5 \text{ МГц}$	48-59	$50 \times 50 \times 25$	ФР- CdHgTe	" " " "
12	0,8 (0,8)	$R_p = 200 \text{ Ом}$; $f = 500 \text{ МГц}$	$10 \div 5 \times 10^5$	40	(модуль)	ФД- PbSe	" " " "
13	1,0	$R_p = 0$; $f = 10 \text{ МГц}$	$50 \div 3,5 \times 10^5$	80	$133 \times 65 \times 42$	ФР- CdHgTe	SORC
14	7,0	$R_p = 0$; $f = 1 \text{ МГц}$	$5 \div 1 \times 10^6$	40	$133 \times 65 \times 42$	ФР- ZnSb ФД- HgCdTe	" " " "
15	4,0	$R_p = 0$; $f = 10 \text{ МГц}$	$5 \div 2,5 \times 10^5$	20	$133 \times 65 \times 42$	ФД- CdHgTe	" " " "
16	0,5	$R_p = 0$; $f = 1 \text{ МГц}$	$1 \times 10^3 \div 1,8 \times 10^7$	20	$133 \times 65 \times 42$	ФД- CdHgTe	" " " "
17	2,5	$R_p = 0$; $f = 1 \text{ МГц}$	$5 \div 1 \times 10^4$	40 или 60	$133 \times 65 \times 42$	ФР- $\text{Ge} \div \text{X}$, PbS , PbSe	" " " "
18	2,0	$R_p = 0$; $f = 50 \text{ МГц}$	$150 \div 3 \times 10^6$	40	$133 \times 65 \times 42$	ФР- $\text{Ge} \div \text{X}$	" " " "
19	3,5 5,5	$f = 1 \text{ МГц}$ $f = 30 \text{ ГГц}$	$0 \div 1 \times 10^7$	100	(ИС)	ФР- ZnSb , KPT	Philips
20	12	$f = 1 \text{ МГц}$	$0 \div 2 \times 10^7$	100	(ИС)	ФР- ZnSb , HgS , PbSe	" " " "

Формирователи сигналов изображения

Расширение функций, выполняемых фотоприемными устройствами, одновременно сопровождается стремлением обеспечить минимальные габариты и массы приемных устройств. Выгодно расположить в фокальной плоскости оптико-электронного прибора единое ФПУ, сочетающее в себе функции приема и обработки оптической информации. Это становится возможным только при широком использовании новых принципов приема, передачи и обработки оптической информации с применением последних достижений микроэлектроники. [13,19,20,29-33-35].

Зарубежными фирмами широким фронтом ведутся разработки и промышленное освоение так называемых твердотельных приемников и формирователей сигналов изображения (ФСИ). Эти приборы, по-существу, являясь аналогами вакуумных приемных ЭЛТ типа видиконов, обладают рядом существенных достоинств. К достоинствам твердотельных приемников изображения следует отнести жесткость геометрического растра, механическую прочность, стойкость к ударам, вибрациям и электромагнитным наводкам. Эти приборы, по сравнению с ЭДТ имеют значительно меньшие габаритные размеры, массу и потребляемую мощность.

До недавнего времени основными типами твердотельных приемников изображения являлись матрицы фотоприемников (фоторезисторов, фототранзисторов или фотодиодов) с координатной выборкой. Выборка отдельных элементов и считывание сигнала (или заряда) с них осуществлялись при помощи сдвиговых регистров. Характеристики приемников изображения с координатной выборкой ограничиваются главным образом, большой емкостью шин, на которые собираются сигналы с ФЧЭ одного столбца или даже с элементов всей матрицы, что ограничивает отношение сигнал/шум, максимально допустимое на выходе прибора. Кроме того, разные столбцы матрицы имеют разную чувствительность к импульсным помехам, возникающим при работе устройств выборки и считывания; эта чувствительность обусловлена паразитными емкостными связями. Разброс паразитной емкостной чувствительности приводит к появлению на изображении полос, т.е. геометрического шума, который очень трудно подавить фильтрацией. Тем не менее последние разработки в области приемников изображения с координатной выборкой, основанные на кремниевой технологии изготовления больших интегральных схем, доведены до стадии промышленного выпуска.

Зарубежными фирмами выпускаются твердотельные линейные приемники изображения, работающие в видимом и коротковолновом ($\lambda_{\text{исд}}=0,6-0,9$ мкм.) участке спектра с числом элементов от 64 до 4096 при размере ф.ч.э. порядка 15 мкм, размещенных с шагом 15-16 мкм., а также матричные приемники с числом элементов до 100 x 100 (самосканирующие фотодиодные матрицы) [29,30].

Одним из крупнейших достижений полупроводниковой электроники минувшего десятилетия, явилось изобретение сотрудниками фирмы Bell Telephone B.C. Бойлом и Дж.Е. Смитом в 1969 г. нового принципа приема и обработки оптической информации с применением приборов с переносом заряда, или приборов с зарядовой связью (ПЗС).

Темпы разработки и внедрения приборов с зарядовой связью не знают себе равных в истории развития электроники, где срок отделяющий идею от промышленного внедрения обычно составлял 5-6 лет. Всего две недели потребовалось для преодоления пути от исходной идеи ПЗС до экспериментального образца и еще три-четыре года до появления в продаже серийных приборов - формирователей сигналов изображения (ФСИ).

В настоящее время зарубежными фирмами выпускаются формирователи сигналов изображения или т.н. фокальные матрицы (Focal plane arrays) гибридного и монолитного типов.

Гибридные формирователи сигналов изображения являются комбинацией ИК-фотоприемников различных типов и кремниевого сдвигового регистра на ПЗС, или коммутатора на МОП транзисторе. В гибридной структуре функции регистрации и обработки сигнала осуществляются различными, но объединенными в одно устройство приборами.

Кремниевый ПЗС в этом случае играет роль выбора для обработки сигнала (процессора) и может выполнять функцию устройства уплотнения усилителя, коррелятора, с временной задержкой и т.д.

Наибольшие успехи достигнуты в разработке гибридных формирователей сигналов изображения на основе КРТ, которые выпускают около 10 ведущих зарубежных фирм.

Монолитный формирователь сигналов изображения на основе ПЗС представляет собой, как правило, многоэлементную стандартную ПЗС-структуру с подложкой из узкозонного или примесного полупроводникового материала, чувствительного к инфракрасному излучению, или комбинацию чувствительной матрицы с внутренней фотоэмиссией на основе барьера Шоттки и считывающего регистра на ПЗС.

Монолитные формирователи сигналов изображения на основе примесных материалов являются приборами, работающими в режиме накопления заряда с использованием переноса основных носителей. Приборы на основе собственных полупроводников работают в режиме обеднения.

Разработкой и выпуском формирователей сигналов изображения на основе собственных полупроводниковых материалов занято более 30 зарубежных фирм. Разработаны и выпускаются монолитные формирователи сигналов изображения на основе кремния, антимонида индия, СОТ, КРТ и т.д.

Наибольшие успехи достигнуты в области создания монолитных приборов на основе кремния собственной проводимости, работающих в коротковолновой части спектра. Зарубежными фирмами выпускаются монолитные формирователи сигналов изображения на основе кремния с числом элементов 488x380 (Fairchild), 512x320 (RCA), 496x475 (Texas Instr.), изготовлена ПЗС матрица и использована для оптического телескопа с числом элементов 800x800 [29-31].

Известно порядка 5 фирм, выпускающих монолитные формирователи сигналов изображения на основе легированного кремния. Эти приборы работают в средневолновой и длинноволновой части ИК-спектра и требуют глубокого охлаждения до температур 50-4,2°К. Недостатком таких приборов являются большие перекрестные помехи.

Разновидностью монолитных формирователей сигналов изображения являются приборы с зарядовой инжекцией (ПЗИ), в которых для считывания, хранения и сканирования использованы инжекция и перенос заряда внутри отдельных фоточувствительных ячеек. Сигнальный заряд, генерированный потоком излучения, собирается и хранится в матрице накопительных МОП-конденсаторов (МОП-структура типа «металл-окисел-полупроводник»). Считывание сигнального заряда в ПЗИ происходит в той же приемной ячейке, где он был коллектирован. Поэтому приемники изображения на основе ПЗИ не содержат дополнительных элементов, предназначенных для переноса заряда. Инжекция заряда в полупроводниковую подложку служит для освобождения фотоприемных ячеек от ранее накопленного сигнального заряда, а в некоторых случаях используется и как способ считывания. Накопительные ячейки ПЗИ могут быть организованы в систему с линейной адресацией (строчные приемники изображения), либо в матричную структуру с двухкоординатной адресацией (двумерные приемники).

Твердотельные монолитные формирователи сигналов изображения с использованием ПЗИ производятся, в основном, на основе антимонида индия 7 ведущими фирмами США.

Количество ФЧЭ в одном приемнике составляет от 1x32 до 32x32, при размере одного элемента порядка 100x 100мкм и шаге между ними порядка 130 мкм.

В последние годы возрос интерес к твердотельным ИК-ФСИ на фотодиодах с барьером Шоттки на основе силицидов металлов (PtSi, PdSi, IrSi). Большие успехи в этом направлении достигнуты фирмой RCA(США). Фирмой созданы самосканирующие формователи сигналов изображения с барьером PtSi/Si, как линейные объемом 1х64 и 1х256 элементов, так и матричные объемом 25х50; 32х64 и 64х128 элементов, совмещенные с ПЗС и предназначенные для применения в устройствах обнаружения.

Вследствие превосходной однородности характеристик (средние колебания чувствительности составляют менее 0,5%) свойственных матрицам с фотодиодами на основе барьера Шоттки не требуется обработки данных, связанной с пространственной неоднородностью чувствительных элементов. Кроме того, процесс фотодетектирования с последующей фотоэмиссией обеспечивают высокое быстродействие, хорошую частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) и очень слабое «расширение» изображения, возникающее вследствие эффекта «горячего пятна».

Современные формователи сигналов изображения на основе фотодиодов Шоттки удовлетворительно работают при температуре ФЧЗ порядка 65-85°К. Площадь фоточувствительной ячейки таких приборов составляет от 20х20мкм до 55х59мкм. Шаг расположения элементов 60-160 мкм.

Из недостатков, присущих ФСИ на фотодиодах Шоттки, следует отметить низкий квантовый выход (1-6% в диапазоне 3-5мкм) и ограниченный спектральный диапазон чувствительности $\lambda_{1\text{ао}}=3,5\text{мкм}$ (для Pd₂Si) и $\lambda_{1\text{ао}}=4,6\text{мкм}$ (для PtSi). Дальнейшие усилия разработчиков направлены на совершенствование приборов с целью повышения квантового выхода, (по крайней мере в 10 раз), и расширения спектрального диапазона вплоть до 6,5 мкм, в основном, за счет применения новых технологических процессов (ионной имплантации и др.) и уменьшения толщины и просветления «прозрачного» металлического электрода.

Применение ионной имплантации позволяет изготавливать многоцветные ФСИ. Такой «многоцветный» приемник в виде матрицы, каждый элемент которой представляет набор двух или более диодов Шоттки с различной высотой потенциального барьера, обеспечивает спектральную селекцию ИК-изображения объекта в диапазоне 3-5 мкм. Считывание информации и дальнейшая обработка сигналов с целью получения псевдоцветного ИК-изображения осуществляется методами цветного телевидения [43].

По оценкам зарубежных специалистов [22-24] формователи сигналов изображения являются наиболее перспективными приемниками ИК-излучения, применение которых возможно для решения подавляющего большинства прикладных практических задач.

Потенциальные возможности применения усовершенствованных мозаичных ФСИ совместно с прогрессивной техникой обработки сигнала существенно расширяют возможности ИК-техники и оснащаемого ею оружия, и создадут возможности для выполнения ФСК принципиально новых функций, недоступных современным приемникам излучения,

Приемники ИК-излучения третьего поколения, т.н. матричные «смотрящие» фокальные устройства в сочетании с совершенным электронным обрамлением не только изменят условия обнаружения, но и приведут к изменению способов и условий обработки и передачи информации.

Применение этих приемников наряду с повышением чувствительности и разрешающей способности аппаратуры позволит полностью избавиться от механического сканирования, что приведет к резкому снижению массы и габаритных размеров аппаратуры, уменьшению потребляемой мощности и повышению надежности ИК-техники.

Совмещение в едином кристалле фокальной матрицы и ПЗС-регистра с целью обеспечения электронного сканирования (считывания) и сокращения числа выводов, приведет к фундаментальным изменениям в конструировании фотоприемников. В едином монолитном устройстве (Into the imaging chip) можно будет не только накопить и обработать сигнал, но и выполнить многие другие функции, например, такие, как устранение размывания изображения из-за потерь в соседних ячейках, устранение радиационных помех, коррекция потерь в ПЗС «длинных» регистрах, сжатие данных для устранения сигналов не несущих информацию, подавление шума и т.д. Дальнейшее совершенствование твердотельных матричных ФСИ позволит передать им ряд новых дополнительных функций, например, таких, как подавление фона, непрерывное визирование и идентификация движущихся целей, одновременное слежение за группой целей; автоматическая регулировка яркости и контрастности изображения и т.д. [20, 25-33, 43, 45].

Основные параметры некоторых типов формирователей сигналов изображения выпускаемых ведущими фирмами приведены в табл. 20. В качестве примера на рис 5 и 6 приведены структурные схемы формирователей сигналов изображения в комплекте с электронным обрамлением.

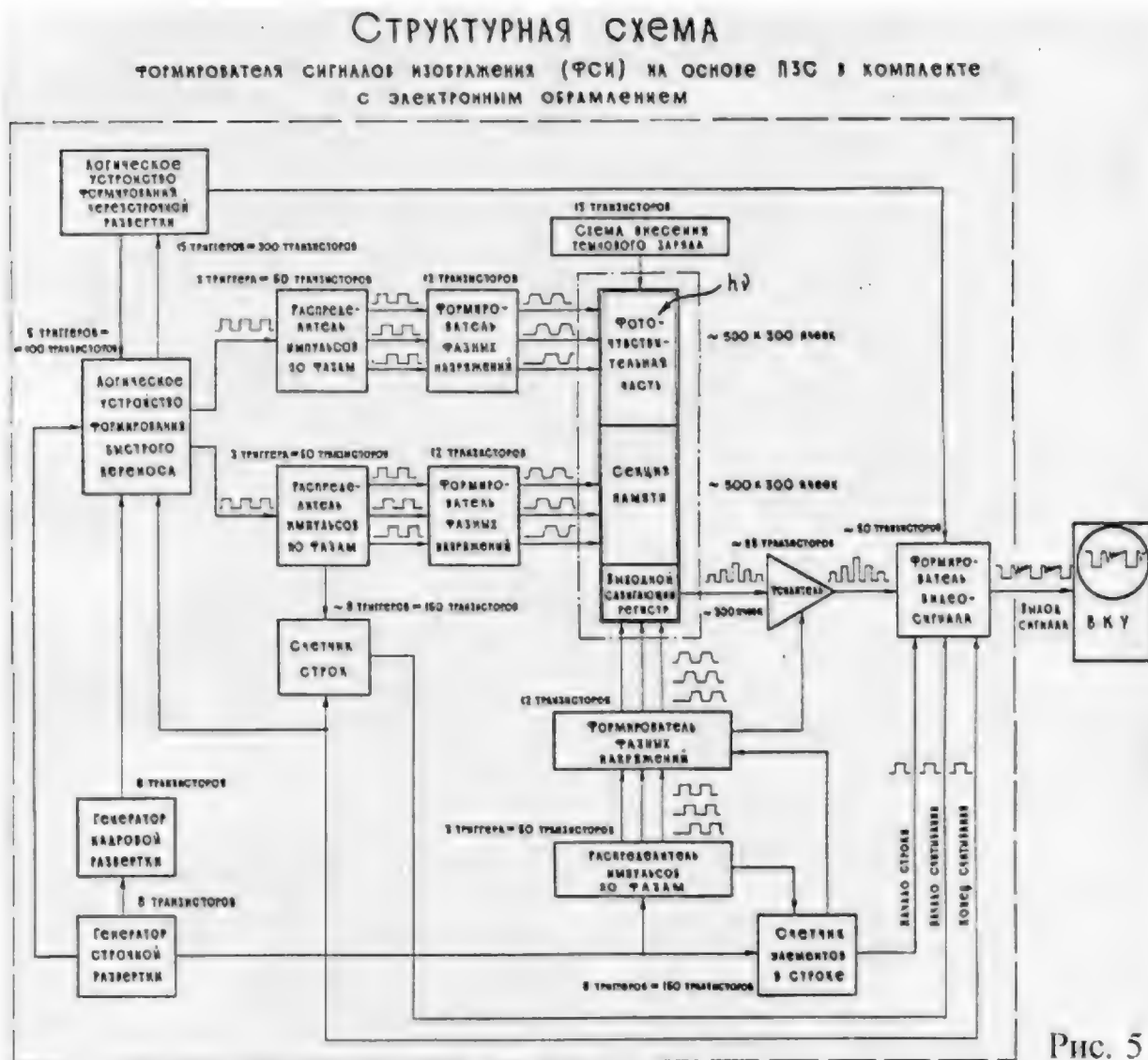


Рис. 5 и 6. Структурные схемы формирователей сигналов изображения в комплекте с электронным обрамлением.

ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ
СИГНАЛОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ (ФСИ), ВЫПУСКАЕМЫХ ВЕДУЩИМИ
ЗАРУБЕЖНЫМИ ФИРМАМИ

Таблица 20

спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм	Материал ФСЗ	Количество ФСЗ	Расположе- ние ФСЗ	Рабочая температу- ра ФСЗ $^{\circ}\text{K}$	Фоновый поток фотонов $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Обнаруживае- мая способность в максимальном спектральном характеристике $D_{\lambda\text{max}}, \text{Вт}^{-1}\text{Гг}^{-1/2}\text{См}^{-1}$	КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ	Тип фотоувелич. линейки или матрицы	Тип коммутатора (регистра сдвига)	ФИРМА-ИЗГОТОВИТЕЛЬ
3-5	InSb	32x32 плашируется 64x64	МАТРИЦА	80	2×10^{12}	$2 \dots 3 \times 10^{12}$	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	SBRC
3-5	InSb	1x20	линейка	65	1×10^{12}	$5,8 \times 10^{11}$	Монолитная ИС	ИК-ПЗС	ПЗС	SBRC
3-5	InSb	1x32 32x32	линейка МАТРИЦА	77	—	1×10^{11}	Монолитная ИС	ПЗИ	—	General Electric Co.
3-5	InAsSb	32x32	МАТРИЦА	77	1×10^{12}	$1,5 \times 10^{12}$	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	Rockwell
3-5	InAsSb	32x32	МАТРИЦА	195	—	—	Монолитная ИС	ПЗС	ПЗС	— " —
3-5	CdHgTe	32x32	МАТРИЦА	77	$2,8 \times 10^{14}$	$4,0 \times 10^{11}$	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	— " —
3-5	CdHgTe	32x32	МАТРИЦА	77	$2,8 \times 10^{14}$	$4,0 \times 10^{11}$	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	Honeywell
8-14	CdHgTe	1x90	линейка	77	—	$9,0 \times 10^3$	Гибридная ИС	ФР	ПЗС	— " —
3-5	CdHgTe	1x50	линейка	77	$4,0 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{-10} \text{ Вт Гг}^{-1/2}$	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	— " —
3-5	CdHgTe	32x32	МАТРИЦА	195	—	—	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	Mullard
8-14	CdHgTe	32x32	МАТРИЦА	77	—	$1,5 \times 10^{10}$	Гибридная ИС	ФД	МОП-Т	— " —
3-5 или 8-14	CdHgTe	плашируется 64x64	МАТРИЦА	—	—	—	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	— " —
3-5 или 8-14	CdHgTe	128x128	МАТРИЦА	77	—	—	Гибридная ИС	ФД	МОП-Т	— " —
3-5	CdHgTe	1x16 32x32	линейка МАТРИЦА	—	—	—	Монолитная ИС	ПЗИ	—	Texas Instruments
3-5	CdHgTe	1x16 1x32	линейка линейка	77	5×10^{15} ($2\theta = 20^{\circ}$)	$1,02 \times 10^{13}$ $5,6 \times 10^{11}$	Монолитная ИС	ИК-ПЗС	ПЗС	— " —
8-14	CdHgTe	64x64 плашируется	МАТРИЦА	77	—	—	Монолитная ИС	ПЗИ	—	— " —
8-14	PbSnTe	10x10	МАТРИЦА	77	—	—	Гибридная ИС	ФД	ПЗС	Thomson - CSF
3-5	Si PtSi	64x128 200x200 плашируется	МАТРИЦА	65-85	—	—	Монолитная ИС	ИК-ПЗС с барьером Шоттки	ПЗС	RCA

Фотоприемники типа SPRITE

В 1974 году сотрудником английской фирмы ESSE (Royal Signals and Radar Establishment) Томом Эллиотом был предложен фотоприемник получивший название TED (Tom Elliot Device -прибор Тома Эллиота).

Вначале 80-х годов TED стали называть SPRITE (Signal Processing in the Element-обработка сигнала в элементе) [37].

Прибор типа SPRITE по функциональному назначению занимает промежуточное место между традиционными многоэлементными фотоприемниками и Формирователями сигналов изображения. По оценкам зарубежных специалистов применение этого прибора позволяет значительно упростить конструкцию тепловизионных систем с последовательным и последовательно-параллельным сканированием, т.к. в нем осуществляются одновременно функции обнаружения, временной задержки и накопления сигнала [36 . . 40].

В общем виде, фоточувствительный элемент SPRITE представляет собой полосу из фоточувствительного п/п материала вытянутую вдоль направления сканирования к которой подведено напряжения смещения.

Смещение обеспечивается посредством двух торцевых омических электродов, соединенных с источником постоянного тока. Считывание сигнала осуществляется посредством третьего электрода, расположенного между торцевыми, также омического, выполняющего роль щупа снимающего электрический потенциал (фотосигнал) .Для считывания сигнала может применяться также и обратносмещенный р-п переход.

Напряжение смещения выбирается такой величины, чтобы скорость дрейфа носителей тока точно соответствовала скорости сканирования изображения. В то время как, каждая точка изображения проходит вдоль фоточувствительного элемента, носители, которые она возбуждает, проходят вместе с ней и продолжают накапливаться. Таким образом, накопление сигнала в SPRITE приемнике происходит в самом элементе, в то время как в обычной линейке ФЧЭ это производится внешними линиями задержки и суммирующими цепочками. Для такого приемника необходим всего один предусилитель и не нужны линии задержки.

Преимущество SPRITE прибора выражается в так называемом факторе интеграции, который пропорционален отношению времени жизни носителей к времени считывания элемента изображения.

В результате роста сигнала в A_{π} раз и одновременного роста шумов в $\sqrt{A_{\pi}}$ раз чувствительность SPRITE приборов, по сравнению с традиционными фотоприемниками, может быть увеличена в A_{π} раз, а обнаружительная способность в $\sqrt{A_{\pi}}$ раз, (где A_{π} - площадь фоточувствительного элемента).

В принципе фоточувствительный элемент SPRITE приемника может изготавливаться из любого фоточувствительного п/п материала, однако, наиболее широкое применение для этих целей получил КРТ. Размеры фоточувствительного элемента приемника, как правило, определяются характеристиками оптической, системы ж необходимой скоростью сканирования. Типовой элемент приемника представляет собой структуру длиной 600...1000 мкм, шириной 50...20 мкм, толщиной порядка 10 мкм. Один фотоприемник может содержать от 8 до 16 фоточувствительных элементов.

Простая 3-х электродная структура 16-ти элементного SPRITE приемника может обладать характеристиками, эквивалентными характеристике традиционного 16-ти канального ФПУ, работающего в режиме ОФ, с 16-ю предусилителями и с соответствующей схемой задержки. Следует отметить, что чувствительность SPRITE приемников для диапазона 3...5 мкм хуже, чем для диапазона 8...14 мкм.

Поскольку SPRITE прибор требует определенных параметров смещения, а применяемые для ФЧЭ материалы ограничиваются преимущественно КРТ, работающим в режиме фотопроводимости, то максимальное число фоточувствительных элементов не должно превышать приблизительно 2000 (в одном приемнике), вследствие джоулева нагрева ФЧЭ [37].

Технология изготовления фоточувствительных элементов SPRITE приемников сравнительно проста, и по-существу, представляет собой технологический процесс изготовления фоторезисторов.

SPRITE-приемник является динамическим прибором, работающим при высоких частотах сканирования.

До оценке зарубежных специалистов SPRITE практически идеально обеспечивают потребности в высококачественных тепловизионных системах и сверх того, непосредственно совмещаются с телевизионным стандартом, однако, для них необходимы относительно сложные и энергоемкие системы сканирования, хотя представляется возможным ещё больше повысить чувствительность SPRITE приборов за счет увеличения числа светочувствительных элементов, отмечается, что такой прибор будет неработоспособным, как при низких, так и при высоких скоростях потока данных. В первом случае из-за низкой скорости сканирования, а во втором из-за слишком большой мощности, рассеиваемой в охлаждаемом приёмнике [39].

В последние годы к выпуску SPRITE приборов на основе КРТ приступили две фирмы Mullard и Philips. Этими фирмами выпускаются 8-ми элементные SPRITE-приемники для работы в спектральном диапазоне 3...5 и 8...14 мкм.

По совокупности своих характеристик 8-ми элементный SPRITE прибор эквивалентен, по меньшей мере, 64-х элементному традиционному фотоприемнику, но содержит только 24 вывода, вместо 65-ти, и требует 8-ми предусилителей вместо 64-х.

В табл. 21 приведены основные характеристики некоторых типов SPRITE-приемников, выпускаемых зарубежными фирмами. [40, 41]

Таблица 21. Типовые параметры SPRITE-приемников на основе КРТ, выпускаемых ведущими фирмами.

Ведущие фирмы-изготовители	Mullard	Mullard	Philips
$D^*, (500^\circ K, 25 \text{ кГц}, 1)$ для экв. элемента $62,5 \times 62,5 \text{ мкм}$, Вт- $1 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5}$	$5 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$(5 \dots 15) \cdot 10^{10}$
Чувствительность ($500^\circ K$, 800 Гц), $\text{В} \cdot \text{Вт}^{-1}$	$1,5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^4$	$(3 \dots 30) \cdot 10^4$
Скорость сканирования, $\text{эл} \cdot \text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^6$
Мощность рассеивания на элемент/приемник, мВт	1,5/12	9,0/80	—
Напряженность поля смещения, $\text{В} \cdot \text{см}^{-1}$	30	30	10...100
Сопротивление ФЧЭ, Ом	3000	500	200...800
Рабочая температура ФЧЭ, $^\circ K$	195	77	82
Угол зрения, град.	28	12	80
Ширина/Длина ФЧЭ, мкм	65,5/ 700	65,5/ 700	65,5/ 700
Количество ФЧЭ	8	8	8
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	3...5	8...13	8...13 (10...13 тип.)

Выводы, тенденции, перспективы

Анализ структуры и уровня параметров продукции, выпускаемой зарубежными фирмами-изготовителями приемников ИК-излучения - основных комплектующих оптоэлектронной аппаратуры, позволяют выявить общие тенденции характерные для современного этапа развития инфракрасной техники - основного потребителя изделий микрофотозлектроники.

I. Ведущие страны запада уделяют большое внимание развитию инфракрасной техники стимулирующей расширение разработок и выпуска приемников ИК излучения для различных отраслей применения. Особо следует отметить значительный рост объемов производства и разработки оптоэлектронных приборов и их компонентов для военного применения. Характер развития закупок оптоэлектронных систем военного назначения Министерством обороны США приведены в табл. 22.

Таблица 22. Характер развития закупок оптоэлектронных систем военного назначения Министерством обороны США

Вид систем, заказчик	Потребность в закупках на 1984 г. в млн. дол.	Средний годовой рост в течение ближайших 5 лет, в %
Системы наведения (ВВС и Армия)	1408	24
Тактические системы получения изображения	563	22
Системы ночного видения (Армия)	484	около 1,5
Системы измерения дальности и целеуказания	236	около 2,0
Тактические системы без получения изображения	22	6
Системы по заказу Береговой охраны США	7	12
Прочие системы	53	15
Всего:	2904	Ср. 14,7

Из табл. 22 видно, что объем закупок оптоэлектронных систем военного назначения в США в 1984 году составлял 2,9 млрд. дол. Средний годовой прирост по прогнозам американских специалистов составит 14,7% - в течение, ближайших 5 лет. При этом, наиболее динамично развивающуюся отрасль представляет производство систем наведения для ВВС и Сухопутных войск. [57].

Разработки современных ИК-приборов по контрактам DOD и НАСА оцениваются миллиардом долларов. На новое поколение тепловизионных приборов переднего обзора Министерством обороны США предусмотрены затраты превышающие 1 млрд. дол.[22, 23].

Командование ПРО Армии США объявило о предоставлении фирме Bating Aerospace контракта стоимостью 289,4 млн. дол. на проведение НИОКР по созданию авиационных средств раннего предупреждения и слежения за межконтинентальными баллистическими ракетами (МРБ). В рамках программы, получившей название «Авиационный оптический помощник» (АОП) многоканальная оптоэлектронная аппаратура рассматривается как один из ключевых элементов инициативы по стратегической обороне (СОИ). [62]

Оптоэлектронные системы наведения широко используются во многих типах современных ракет, таких как Maverick, Sidewinder, Hellfire, Stinger POST, Copperhead и др. Число таких ракет будет расти и дальше, т.к. по мнению зарубежных специалистов, их еще недостаточно для ведения длительных боевых действий. [57].

Ещё в 1982 году командование Армии США заключило контракт с тремя ведущими фирмами: Hughes Aircraft Co., Ford Aerospace, McDonnell Douglas Corp на общую сумму более 3,3 млн. дол. на разработку ИК ГСН с мозаичным приемником для установки на ракетах различного назначения. Цель программы - разработка единой ИК ГСН нового поколения для применения в будущих системах оружия Армии и ВВС США. Программа финансируется в рамках проекта «Технология чувствительных элементов» [56].

В настоящее время в Министерстве обороны США зарегистрировано около 130 разрабатываемых, выпускаемых и находящихся в эксплуатации оптико-электронных систем военного назначения, в которых применяется волоконная оптика и её элементы. Диапазон применения волоконно-оптических систем очень широк - от традиционных сетей оптической связи до предложенной президентом Рейганом программы «Звездных войн» - системы противоракетной обороны [61].

По оценке зарубежных специалистов в последующие годы особенно возрастет роль боеприпасов с наведением на конечном участке траектории, в том числе, и при помощи квантовых (КГС) и тепловых головок самонаведения (ТГС). Производство самонаводящихся боеприпасов может быть развернуто в таком количестве, что у каждого солдата появится возможность противостоять атаке таких мобильных и дорогостоящих видов вооружения как танки, вертолеты, штурмовая авиация. Изготовление таких боеприпасов приведет к дальнейшему увеличению объемов выпуска изделий микрофотоэлектроники [57].

Зарубежные источники информации отмечают весьма высокую стоимость оптико-электронной аппаратуры военного назначения. Например, стоимость сравнительно простых тепловизионных приборов для Армии США составляет от 8 до 60 тысяч долларов, достигая 150-625 тысяч дол. для сложных ИК-систем переднего обзора и управления огнем (например, AN/AAQ-5, AN/AAQ-29) и т.п. Оптико-электронное оборудование современного танка М1 (США) составляет до 10% его стоимости (2,8 млн. дол.), что во многом определяется стоимостью используемых в ИК - аппаратуре приемников излучения. [58].

2. Большинство развитых капиталистических стран уделяет большое внимание разработке и расширению промышленного выпуска изделий микрофотоэлектроники. Число фирм-изготовителей изделий микрофотоэлектроники в 1985 году превысило 320.

Зарубежными фирмами освоен промышленный выпуск практически всех, известных на сегодня, разновидностей и типов приемников инфракрасного излучения, на основе всех известные полупроводниковых материалов и сегнетоэлектриков, пригодных для этих целей.

Наиболее распространенными материалами, используемыми для выпуска фотоприемников, являются: кремний, КРТ, антимоид индия и германий.

Более 40 зарубежных фирм, по-прежнему, выпускают фотоприемники на основе сернистого свинца, которые до сих пор пользуются большим спросом, как для важнейших военных программ, так и для промышленного и коммерческого применения.

Наиболее массовой продукцией зарубежных фирм являются кремниевые и германиевые фотодиоды.

Более трети известных зарубежных фирм освоили промышленный выпуск фотоприемных устройств (ФПУ) и тепловых приемных устройств (ТПУ).

Более десяти ведущих зарубежных фирм приступили к промышленному выпуску многодиапазонных фотоприемников и формирователей и сигналов изображения (ФСИ). Фирма Mullazd приступила к промышленному выпуску ФСИ типа SPRITE.

3. Имеющиеся в открытой печати сведения о фирмах-изготовителях ИК-приемников, их номенклатуре, объемах выпуска и уровне фотоэлектрических параметров, позволяют предположить, что выпуск приемников инфракрасного излучения в ведущих капиталистических странах осуществляется в подавляющем большинстве случаев, фирмами специализирующимися на разработке и выпуске полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и радиокомпонентов различного назначения [2,3,4,25,27, 41, 42, 73, 74].

Подавляющее большинство зарубежных фирм специализируется на выпуске 1-3 типов приемников ИК-излучения, с использованием 1-2 полупроводниковых материалов

Наибольших успехов в разработке и выпуске приемников ИК-излучения добилась 21 фирма. Ведущими странами в области создания и промышленного выпуска фотоприемников являются США, Франция, Англия, Япония, ФРГ и Голландия (См. табл. П1, П2, П3).

Фирмы «гиганты» выпускают 7 до 24 типов приемников излучения, используют от 4 до 11 полупроводниковых материалов (См. табл.25).

Ведущими фирмами являются: SBRC, RCA, Hughes Aircraft, Barnes Jng. (все США), Mullard (Англия), Hamamatsu (Япония), RTC и SAT (Франция).

По уровню достижений в области создания, исследований и разработки промышленных технологий изготовления фотоэлектрических п/п приемников ИК-излучения ведущее место в капиталистическом мире принадлежит фирме SBRC (Santa Barbara Research Center) дочернему филиалу американской фирмы Hughes Aircraft Corp.

4. Уровень фотоэлектрических параметров промышленных образцов основных типов приемников ИК-излучения достаточно высок и практически приблизился к теоретически возможному пределу (см. табл. 2 и рис. П5), что свидетельствует как о высоком качестве разработок и совершенстве применяемых технологических процессов и т/оборудования, так и о высоком качестве материалов и полуфабрикатов, используемых в производстве.

Минимальные геометрические размеры чувствительных элементов серийно выпускаемых приемников излучения составляют 20-50 мкм, при величине зазоров между ними порядка 13-25 мкм. Количество чувствительных элементов в серийно выпускаемых линейных и матричных приемниках ИК-излучения превысило 100 и более в одном приборе.

Перспективная потребность в количестве ФЧЭ для головок само-наведения ракет и снарядов третьего поколения составляет от 16 тыс. до 50 тысяч ФЧЭ в одном приемнике. Для разработки аппаратуры по программе «Авиационный оптический помощник» разрабатываемой в рамках Инициативы по стратегической обороне для обеспечения расчетной дальности действия (1400-8500 км), требуется создание фотоприемного устройства с двухсегментным и трехсегментным расположением от 1310 до 125000 элементов, в каждом фотоприемнике, работающем в диапазоне 8...12 мкм. Эти требования более, чем в 50 раз превышают достигнутые на сегодня технологические возможности производства. [62]

5. Особое место в структуре продукции, выпускаемой ведущими зарубежными фирмами, занимают фотоприемники, используемые в тепловизионной аппаратуре различного назначения, включая ТГС, работающие по «тепловому образу» цели. По оценке зарубежных специалистов к 1979 году общее число фоточувствительных элементов во всех изготовленных экземплярах ИК-тепловизионных систем переднего обзора достигло миллиона [22].

Однако промышленность еще не готова полностью обеспечить производство требуемого количества ИК-приемников для современного поколения ИК-систем, использующих тепловизионный принцип приема и обработки информации.

6. Следует отметить колоссальные усилия, предпринимаемые ведущими странами запада по созданию высококачественных, надежных и дешевых фотоприемников на основе КРТ. Только в США в области КРТ технологии работает более 1000 ведущих специалистов в нескольких десятках фирм и научных организаций. Большинство исследований финансируется Управлением перспективных программ (DATRA) Министерства обороны США, тремя родами вооруженных сил и различными объединенными фондами.

Обширные программы в области КРТ-технологии реализуют Оборонный, Броуновский и Стенфордский университеты, а также университеты штатов Висконсин, Северная Каролина (г. Рэйлей), Иллинойс (г. Чикаго); Массачусетский и Калифорнийский технологический институты, технологический институт штата Джоржия (г. Атланта), исследовательский центр в Новой Англии (г. Сэдбюри), исследовательские центры фирм Ferrmoris, Westinghouse, Martin Marietta, Ford Aerospace, Hughes Aircraft и др.

Помимо этого в этой области активно работают многочисленные фирмы и научные организации в Великобритании, ФРГ, Израиле, Нидерландах, на Тайване, во Франции, ЮАР, Японии и др. странах. [30]

7. Достижения в области создания современных и перспективных ИК-систем и приборов определяются эволюцией развития приемников ИК-излучения. Основные направления развития фотоприемников, представляющие наиболее общие тенденции приведены на рис. П5.

Рассматривая проблемы и перспективы развития ИК-техники можно предположить, что в последующие годы будет происходить дальнейшее совершенствование ИК-приемников, рост степени интеграции входящих в них элементов, повышение функциональной сложности и расширение их функциональных возможностей; улучшение фотоэлектрических параметров, эксплуатационных и производственно-экономических характеристик приемников излучения.

Анализ тенденций разработки и промышленного выпуска фотоприемников в капиталистических странах позволяет предположить следующее:

- в ближайшие годы следует ожидать дальнейшего увеличения выпуска всех типов фотоприемников и ФПУ, работающих в ультрафиолетовой и коротковолновой областях спектра, на основе кремния и соединений A^3B^5 , предназначенных для использования в лазерных дальномерах, полуактивных системах наведения и управления оружием и боеприпасами, волоконно-оптических линиях связи;

- по всей вероятности, в ближайшие годы будет увеличиваться выпуск фотоприемников и ФПУ на основе антимонида индия и КРТ, работающих в средневолновой части спектра. Будет осуществляться переход с выпуска фоторезисторов на выпуск фотодиодов, как в одноэлементном исполнении, так и в многоэлементном исполнении;

- следует ожидать увеличения промышленного выпуска многодиапазонных фотоприемников и ФПУ, использование которых повышает помехоустойчивость аппаратуры, увеличивает вероятность обнаружения и повышает точность наведения управляемого вооружения и боеприпасов;

- по оценкам зарубежных специалистов в ближайшие годы ожидается переход производства большинства фотоприемников на один «универсальный» полупроводниковый материал, позволяющий создавать фотоприемники, работающие в различных областях спектра, при температурах ФЧЭ от $77^\circ K$ до $300^\circ K$. Несмотря на нестабильность электрофизических характеристик, по-прежнему, предпочтение отдается КРТ.

- можно ожидать улучшения параметров большинства серийно выпускаемых фотоприемников до теоретически возможного предела (Рис. П6);

- усилия технологов и разработчиков технологического оборудования, очевидно, будут направлены на создание технологических процессов и парка оборудования, обеспечивающих промышленный выпуск фотоприемников с минимальными размерами ФЧЭ (до 10-25 мкм) и зазорами между ними порядка единиц микрометров, с числом фоточувствительных элементов, превышающем 1000 в одном приборе. При этом большое внимание будет уделяться как резкому повышению % выхода годных изделий, так и повышению уровня стандартизации и унификации выпускаемых приемников излучения и аппаратуры;

- ведущими фирмами, очевидно, будет осуществлен постепенный переход от выпуска дискретных фотоприемников к выпуску фотоприемных устройств с последующим усложнением электронного обрамления ФПУ и дальнейшим переходом к выпуску формирователей сигналов изображения. В начальной стадии этого перехода речь может идти о замене 60-180 элементных фотоприемников на фокальные линейные формирователи сигналов изображения и SPRITE приборы [22, 23, 36-40];

- в качестве основного ИК-приёмника будущего зарубежными специалистами определен мозаичный (матричный) фокальный ФСИ, который предполагается использовать для решения большинства задач прикладного и практического назначения (См. таблицу 23).

Таблица 23. Прогноз применения мозаичных (матричных) фокальных приемных устройств [23]

Прогнозируемые применения	Спектральный диапазон, мкм	Рабочая температура ФЧЭ, °К	Оценка числа элементов в мозаике
Обзор космоса с космических летающих аппаратов	2 - 20	4,2 - 77	$10^5 - 10^8$
Обзор Земли с космических летающих аппаратов	2 - 20	4,2 - 77	$10^5 - 10^8$
Захват цели и управление огнем	8 - 12	77	10^5
ИК-разведка	8 - 12	77	$10^3 - 10^4$
Носимые оружейные прицелы	3 - 5	190	$10^3 - 10^4$
	8 - 12	77	
Тепловые головки самонаведения	3 - 5	190	$10^3 - 10^4$
Индивидуальные ночные прицелы.	3 - 5	190	10^3
Технически оснащенное оружие.	3 - 5	300	10^3

- При разработке формирователей сигналов изображения, очевидно, будут использованы как гибридный, так монолитный варианты конструктивного исполнения ФСИ.

- Основной бум в промышленном выпуске мозаичных формирователей сигналов изображения, по оценкам зарубежных специалистов, намечается на 1984 - 1989 г.г. В течение всего этого времени спрос на выпускаемые ИК-приемники современного поколения должен снижаться [23].

- Начало серийного производства мозаичных формирователей сигналов изображения на диапазоны 3-5 и 8-14 мкм прогнозируется следующим образом: матрицы с числом элементов 32х32 и 64х64 с 1983 г., 255х255 с 1985г.; 1024х1024 с 1987 г. /22/.

Матрицы на диодах с барьером Шоттки с 10 000 - 80 000 элементами, по мнению зарубежных специалистов, станут доступными в ближайшее время [56]. По мнению зарубежных специалистов, прогнозируемый выпуск матричных формирователей сигналов изображения обеспечен реализацией национальных программ 30-х годов ведущих капиталистических государств [23]. Предполагается, что предельное количество фоточувствительных элементов монолитных формирователей сигналов изображения третьего поколения будет составлять $1,0 \cdot 10^8$ элементов, т.е. разрешающая способность таких приборов будет приближаться к разрешающей способности глаза ($1,3 \cdot 10^8$ элементов);

По оценкам зарубежных специалистов, рынок мозаичных фокальных формирователей сигналов изображения для одних только военных применений может превысить 100000 единиц.[22, 23].

Сочетание фокального матричного фотоприемного устройства с высококачественной цифровой схемой обработки сигнала, по мнению зарубежных специалистов, обеспечат никогда до сих пор не достигавшиеся характеристики аппаратуры и приведут к созданию третьего поколения оптико-электронной аппаратуры [23]

8. Учитывая технологические преимущества и низкую стоимость тепловых приемников излучения, в первую очередь, пироэлектрических, следует ожидать дальнейшего развития работ с целью снижения инерционности ТПИ и повышения их чувствительности до термодинамического предела, освоения промышленного выпуска высококачественных малоразмерных, многоэлементных и матричных приемников, применение которых в ряде направлений ИК-техники более рационально, чем фотонных.

- Начало серийного производства мозаичных формирователей сигналов изображения на диапазоны 3-5 и 8-14 мкм прогнозируется следующим образом: матрицы с числом элементов 32х32 и 64х64 с 1983 г., 255х255 с 1985г.; 1024х1024 с 1987 г. /22/.

Матрицы на диодах с барьером Шоттки с 10 000 - 80 000 элементами, по мнению зарубежных специалистов, станут доступными в ближайшее время [56]. По мнению зарубежных специалистов, прогнозируемый выпуск матричных формирователей сигналов изображения обеспечен реализацией национальных программ 30-х годов ведущих капиталистических государств [23]. Предполагается, что предельное количество фоточувствительных элементов монолитных формирователей сигналов изображения третьего поколения будет составлять $1,0 \cdot 10^8$ элементов, т.е. разрешающая способность таких приборов будет приближаться к разрешающей способности глаза ($1,3 \cdot 10^8$ элементов);

Литература:

1. Хадсон Р. Инфракрасные системы. Изд. «Мир», Москва, 1972г.
2. Справочник Д.А.Т.А. Book, 1979, 1980, 1981 г.г.
3. Перечень зарубежных фирм. ОНТИ предприятия условный инд.218, 1981 год.
4. Ушакова М.Б. Зарубежные фирмы, выпускающие фотоприемники. Фактографическая справка №4785, 1979 год.
5. Ушакова М.Б., Акишин С.Я. Кремниевые фотоприемники УФ-излучения. Фактографическая справка №4684, Вып. 30.
6. Ушакова М.Б., Косырева Г.Н. Фотодиоды на основе германия и кремния. Фактографическая справка №987(82), Вып.71.
7. Ушакова М.Б., Косырева Г.Н. Кремниевые фотодиоды фирмы Hamamatsu, Япония. Фактографическая справка №457(2), Вып.67.
8. Ушакова М.Б., Васильев Ю.А. Фотоприемники на основе соединений системы A^3B^5 . Фактографическая справка №585, Вып.31.
9. Чернецкая Л.И. Фоторезисторы на основе антимонида индия. Фактографическая справка №10213, Вып. 57.
10. Чернецкая Л. И. Фотодиоды на основе антимонида индия. Факто-графическая справка №8905, 1980 г.
11. Ушакова М.Б. Многодиапазонные фотоприемники. Факто-графическая справка №10214, Вып. 56.
12. Косырева Г.П. Фотоприемники кадмий-ртуть-теллур на спектральный диапазон 3-5 мкм. Фактографическая справка б/н, 1981 г. ОНТИ предприятия условный инд.218.
13. Косырева Г.Н. Уровень цен на зарубежные фотоприемники кадмий-ртуть-теллур. Фактографическая справка №7555, 1980 г.
14. Ушакова М.Б. Фотоприемники на основе кадмий-ртуть-теллур фирмы NERC (США). Фактографическая справка б/н, 1982 г. ОНТИ предприятия условный инд.218.
15. Косырева Г.Н. Фотодиод на основе свинец-олово-теллур. Фактографическая справка, №8, 1979 г.
16. Ушакова М.Б. Фотоприемники фирмы SBRS (США). Сборник рефератов по каталогу фирмы, ОНТИ предприятия условный инд.218, 1960 год.
17. Бовина Л.А., Шаронов Ю.П. Механизмы рекомбинации в CdHgTe и фотоприемниках на его основе. Аналитический обзор за 1969-1981г.г. №3063, 1983 г.
18. Ушакова М.Б., Шахиджанов С.С. вокальные матрицы для ИК-области спектра. Справка №119382/, вып.73.
19. Насакина И.С. Трищенко М.А., Эскин 10.11. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью в оптико-электронных системах военного и космического назначения. Микрообзор №1382(82), вып.74.
20. Приборы с зарядовой связью. Под ред. Барба Д.Ф. Пер с англ. «Мир», Москва, 1982 г.

21. Насакина И.С., Ципис И.Л. Предусилители для фотоприемников. Фактографическая справка №7834, вып.44.
22. Ллойд Д.Б. Тепловизионные матрицы с числом элементов 10^6 . Перевод с англ. №ПЛ-514/80.
23. Ллойд Д.Б. «Смотрящие» инфракрасные приемные устройства. ч.II. Перевод с англ. №ПЛ -528/80.
24. Ллойд Д.Б. «Смотрящие» инфракрасные приемные устройства. ч.III Перевод с англ. №ПЛ -530/80.
25. Шапиро. Сводная таблица, материалов и параметров приемников ИК-излучения. «Электроника», 1959, №2, стр. 21-26.
26. Optoelectronic Product Directory, Electro Optical Systems Desing, May, 1974, p.p 20-36.
27. Laser Focus Buyers' Guige, 1975, Circie №67, p.p. 20 – 36.
23. Гофман СП., Хигби Р.Ф. Применение методов молектронной техники к инфракрасным системам. ТИИЭР, №12, 1964 г., стр.1883-1887.
29. Приборы с зарядовой связью. Под ред. Хоувза М. , Моргана Д. Пер. с англ., Энергоиздат, М.:, 1981г., 376 с.
30. Секен К., Томпсет М., Приборы с переносом заряда. Пер.с англ. «Мир», М.:, 1978 г., 327 с.
31. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. Под ред. П.Йесперса, Ф.Ван де Виле, Пер.с англ.. «Мир». М: , 1979г. , 573 с.
32. Барбе Д.Ф. Приборы с зарядовой связью для формирования сигналов изображения. ТИИЭР, 1975г., т.63, №1, стр.45-79.
33. Стикл А.Дж., Нельсон Р.Ф., Френч В.Т., и др. Применение приборов с зарядовой связью для регистрации ИК-сигналов и формирования изображения. ТИИЭР, 1975г., т.63, №1, стр.79-38.
34. Картотека зарубежных фирм, выпускающих фотоприемники. ОНТИ предприятия условный индекс 218.
35. Аксененко М.Д., Баранчиков М.,Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. М.:, Энергоатомиздат, 1934 г., 208 с.
36. Эллиот К.Т. Новое фотоприемное устройство для тепловизионных систем. Перевод с англ. №ПЛ -560/81.
37. Халм К.Ф. Международная конференция по новейшим разработкам ИК-приемников и систем. Перевод с англ. №ПЛ -597/32.
38. Спиро Н. Дж. Комментарий к конференции по новым типам ИК-приемников и систем. Перевод с англ. №ПЛ -512/83.
39. Чарльстон Д.Е. Последние достижения в области создания ИК-приемников на основе теллуридов кадмия и ртути. Перевод с англ. №ПЛ -523/32.
40. Чари Дд.А.,Мортен Ф.Д, Фотоприемники для тепловизионных систем. Перевод с англ. из журнала Electronic Components and application, vol 4, №4, avgust, 1982, p.p 242 – 252.
41. Philips, Data handook, Electron tubes, Port 10, May, 1982.
42. Infrared components Brochure, Edition 47, Santa Barbara Research Center USA, 1983.
43. Полевщикова Н.В, Тенденции развития фокальных ИК-матриц на основе силицидов металлов с барьером Шоттки. Выпуск 101, Фактографическая справка №117/85, ОНТИ предприятия условный индекс 216.
44. Ушакова Н.Б., Насакина И.С. Фотоприемники для ВОЛС на основе германия и полупроводникового соединения галлий-индий-мышьяк. Фактографическая справка №598/33/, ОНТИ предприятия условный индекс 218.
45. General Electric. Preliminafu specificalton. CID. IR-sensor module 27843.
46. Loser Focus Buyers' bulge, 1970, pp. 59 – 64.

47. Справочник по лазерам. Том II. Пер. с англ. под ред. А.М.Прохорова, М.: Советское радио, с.137-158.
48. Кременчугский Л.С. Сегнетоэлектрические приемники излучения, Киев, Наукова думка, 234 с.
49. Полупроводниковые фотоприемники. Материалы 34-го международного авиационного салона в г. Париже. 1981 г. ОНТИ предприятия условный индекс 218.
50. Полупроводниковые фотоприемники. Материалы 35-го международного авиационного салона в г. Париже 1983 г. ОНТИ предприятия условный индекс 218.
51. Thehhnal and Photon Infrared detectors, Barnes Ing., Bulletin 2-351.
52. Guide Iingernievr. Semiconductevrs, edition 1978. RTC.
53. Guide Iingernievr. Semiconductevrs, edition 1979. RTC.
54. ORIEL Infhahed. Laser Optics, Detectors...-, 1978.
55. ORIEL Pheisliste. 09-1977.
56. Любимов Е.Е. Современное состояние и перспективы развития ГСН ракет класса «воздух-воздух» с матричными ФПУ за рубежом. Обзор №100/85. Вып.101. ОНТИ предприятия условный индекс 217.
57. Шевцов, Грамматчиков С. В. Военная оптико-электронная аппаратура и перспективы её использования в США. Справка №524(85), Вып.104, ОНТИ предприятия условный индекс 215.
58. Овчинникова Л.Н. Данные о стоимости зарубежных тепловизионных приборов. Фактографическая справка. ОНТИ предприятия условный индекс 218.
59. Материалы выставки «Лазер-оптоэлектроника -79», Мюнхен, июль, 1979 г. ОНТИ, предпр. усл. инд.218.
60. Грамматчиков СВ. ИК-фотоприемники и матрицы для фотоприемных устройств, расположенные в фокальной плоскости. Справка №38(85), Выпуск 105, ОНТИ предприятия условный индекс 215.
61. Джон Рза. Широкое применение волоконной оптики в военной технике. Справка №525 (85), Выпуск 104, ОНТИ предпр. усл. инд.215.
62. Грамматчиков СВ., Клименко П.Ф. О разработке в США авиационных оптических средств раннего предупреждения в интересах ПРО. Справка №1750(84). ОНТИ предприятия условный индекс 215.
63. Зарубежные фирмы, разрабатывающие и выпускающие фоточувствительные приборы с зарядовой связью. Справка №1020(85), Выпуск 107. ОНТИ предприятия условный индекс 218.
64. Дилевская Е.В. Криогенные микротеплообменники. М.: «Машиностроение», 1978 г. , 165с.
65. Антонов Е. и др. Устройства для охлаждения приемников излучения. Ленинград, «Машиностроение», 1969 г. 247 с.
66. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника, М.: «Машиностроение», 1977 г., 232 с.
67. Суслов А.Д. .Горшков А.М., Маслаков В.А. Дроссельные микроохладители. М.: «Машиностроение», 1973г., 144 с,
68. Вайнер А.Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. М.: Советское радио, 1976 г., 136 с.
69. Справочник по приемникам оптического излучения. Под ред. Криксунова. Киев, Техника, 1985г.
70. Броденский В.М., Громов Е.Н., Грезин А.К. и др. Эффективные дроссельные криогенные рефрижераторы, работающие на смесях. Химическое и нефтяное машиностроение, 1971, №12, с. 13-13.

71. Инфракрасные методы в космических исследованиях. Пер.с англ. под ред. Мороза В.И., М.: Мир, 1977.
72. Richahd E., Harris. P3S... Mr. Versatility of the detector world. Electro-Optical System Desing, December, 1976, p.p. 47 – 50.
73. Рылеева С.С. Некоторые экономические аспекты деятельности американских микроэлектронных фирм в 1956-1973г.г. Выпуск 1(213). М.: НИИ «Электроника», 1974 г.
74. Рылеева С.С. Характеристика деятельности микроэлектронных фирм США. Выпуск 2(292). М.: НИИ «Электроника», 1975 г.

Приложение

[illegible]

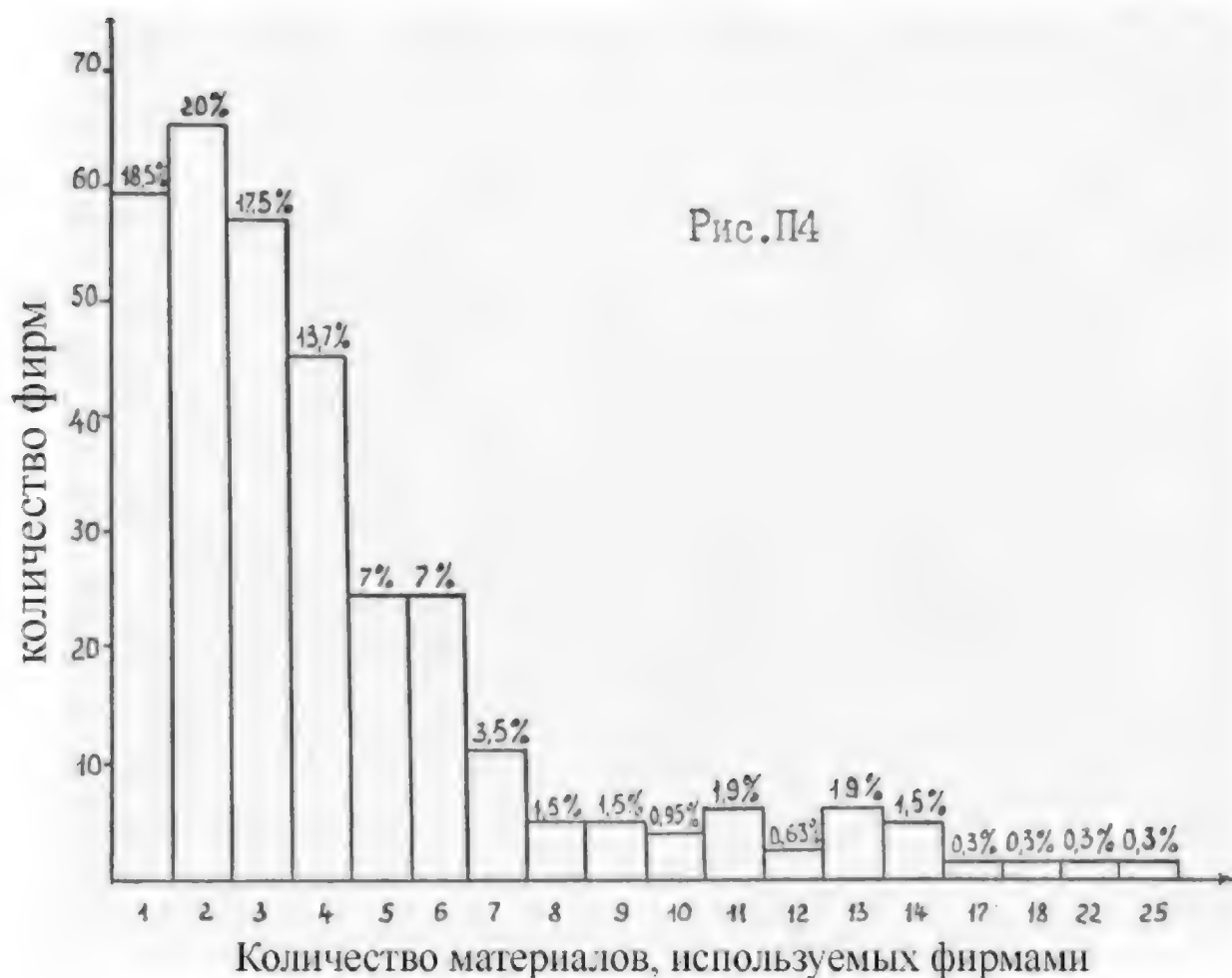
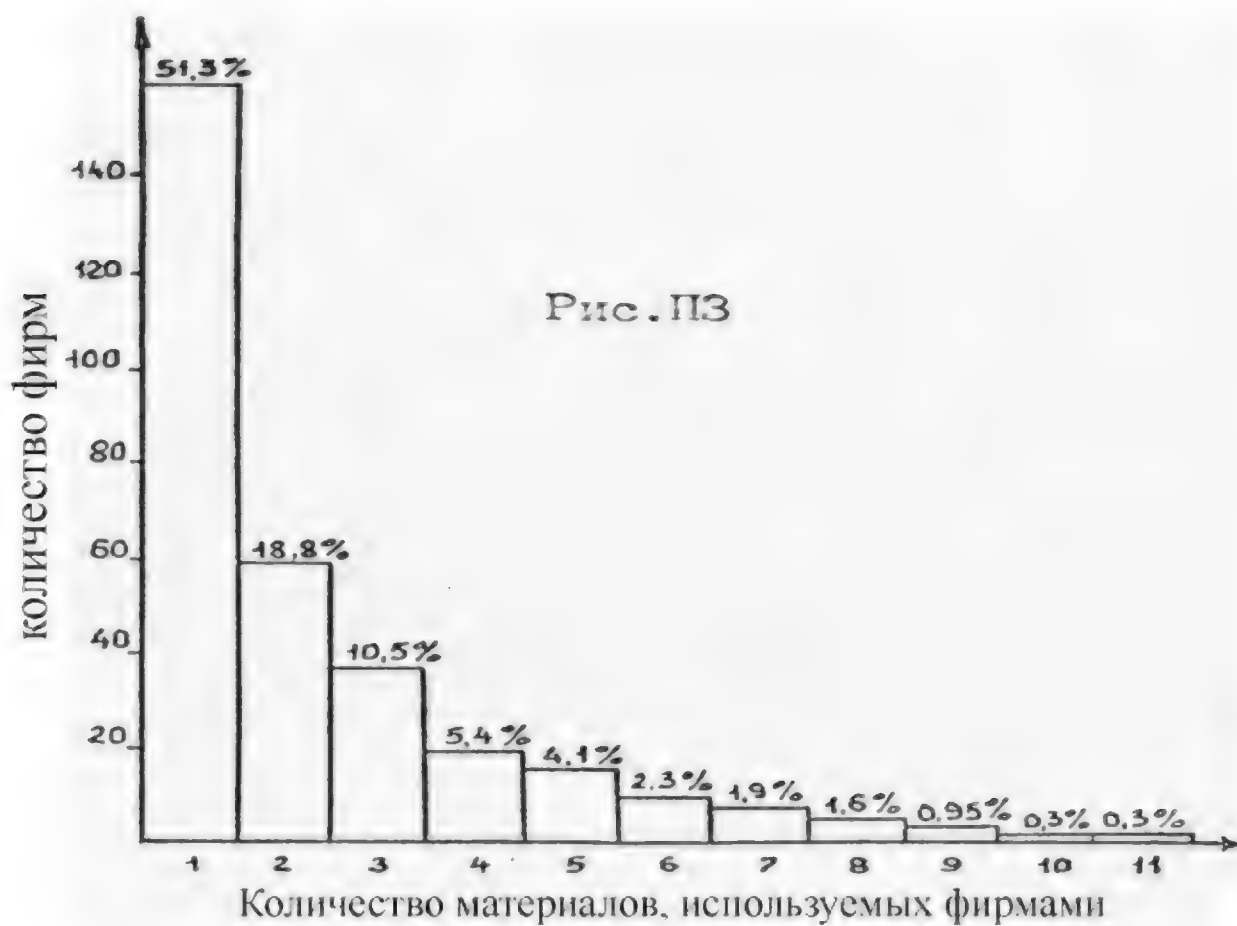


Рис. ПЗ и П4. Статистические сведения о продукции, выпускаемой зарубежными фирмами.

Основные направления развития фотоприёмников

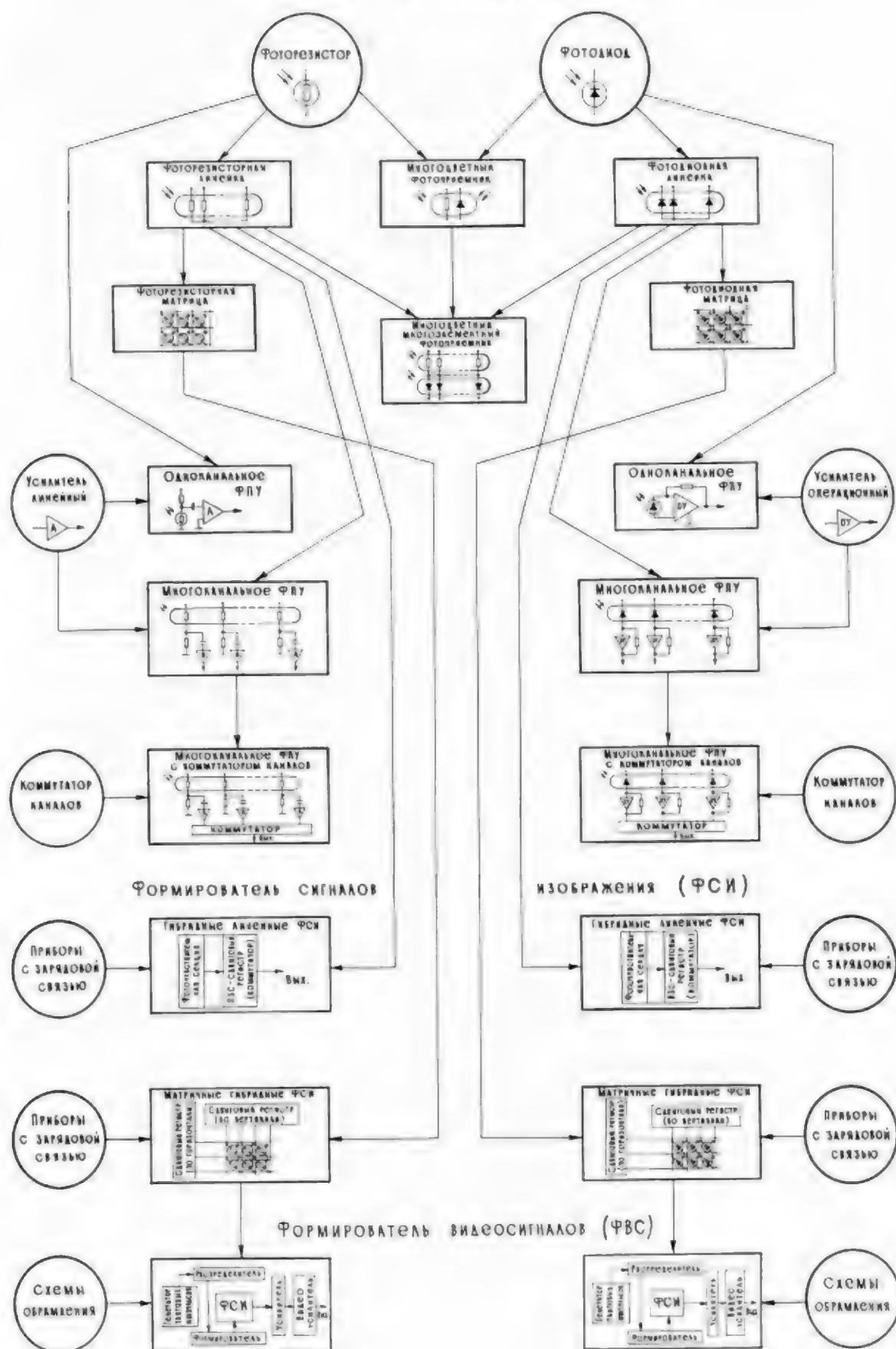


Рис. П5. Основные направления развития микрофотозлектроники

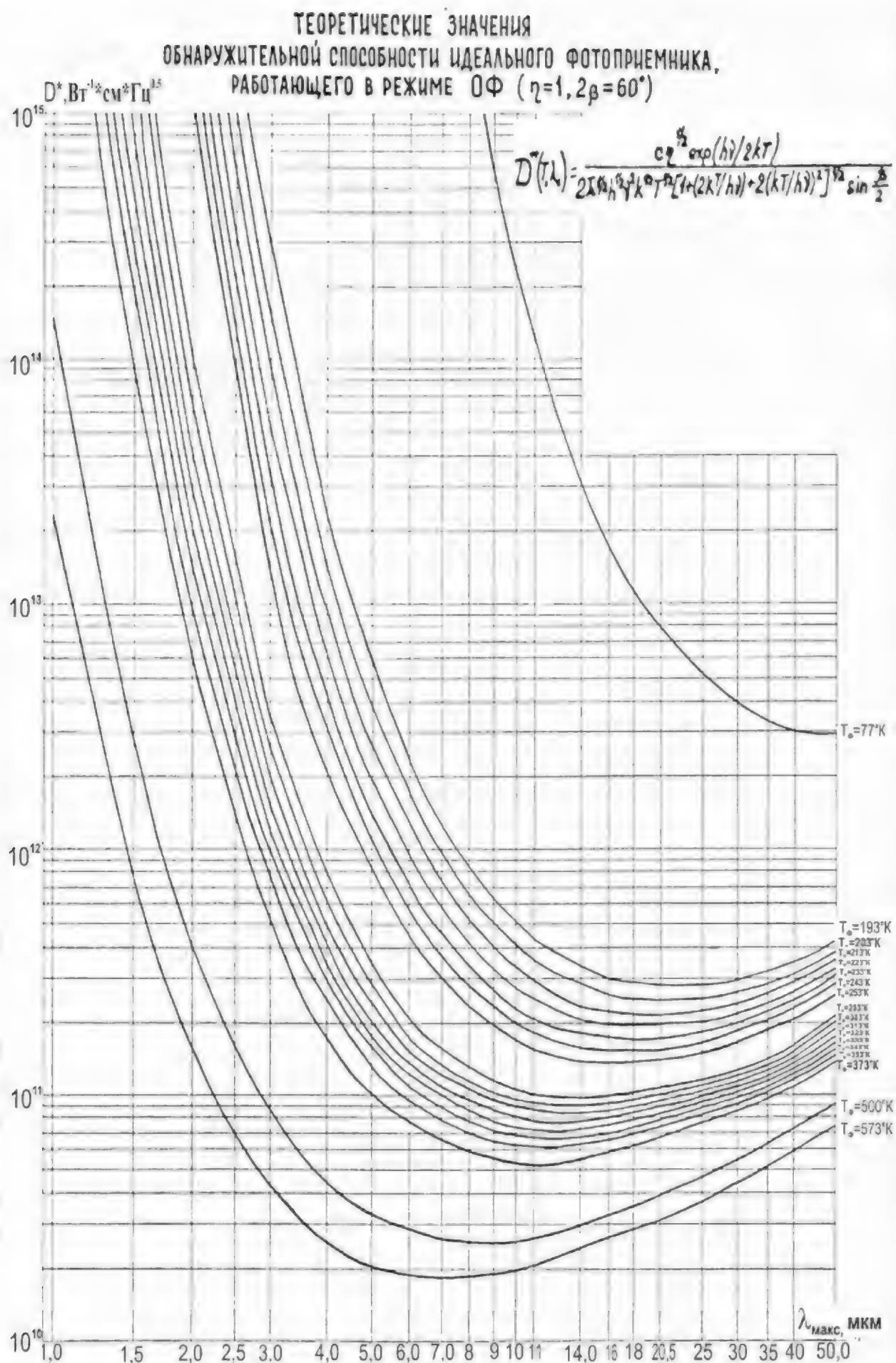


Рис. П6. Теоретические параметры идеального фотоприемника.

Антимонид индия (InSb) [1]

Тип	ФП
Размеры эле-мента	0,5×0,5÷10×10 мм; прямоугольные эле-менты шириной от 0,05 мм, минимальный шаг элементов мозаики 0,025 мм
Постоянная времени	Менее 10 мксек даже при экранировании
Сопротивление	(2–10) ком
Чувствительность	$2 \cdot 10^4$ в·вт ⁻¹

$$\frac{D^* (\text{макс.})}{D^* (500^\circ \text{K})} = 5,7$$

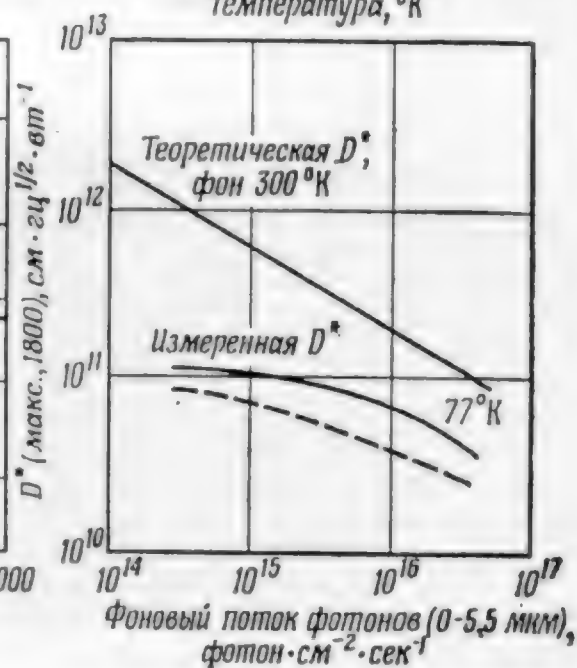
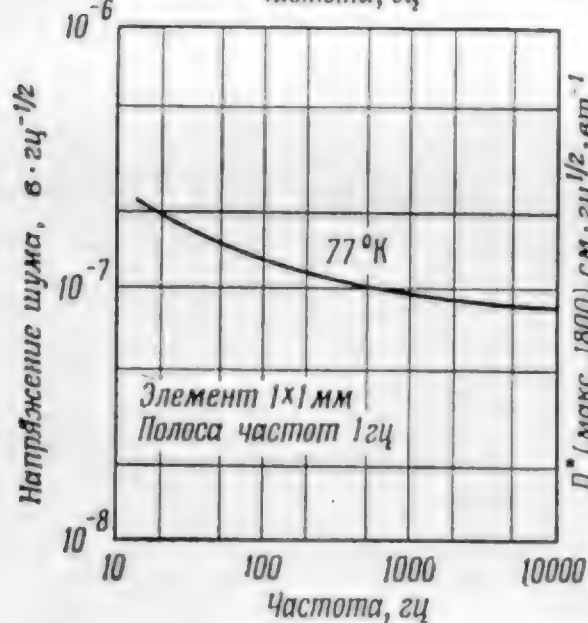
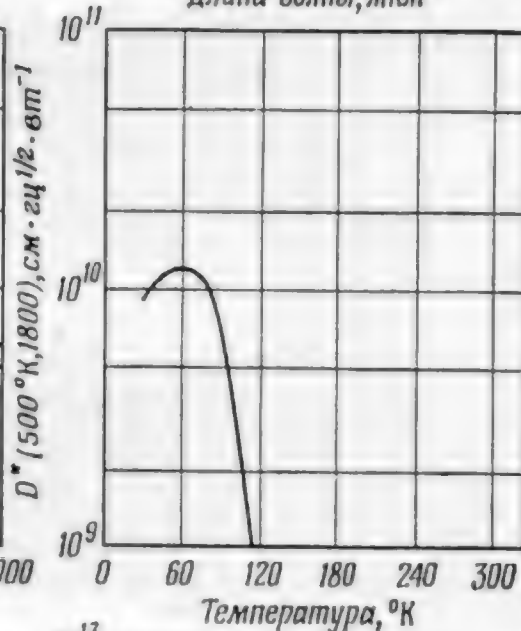
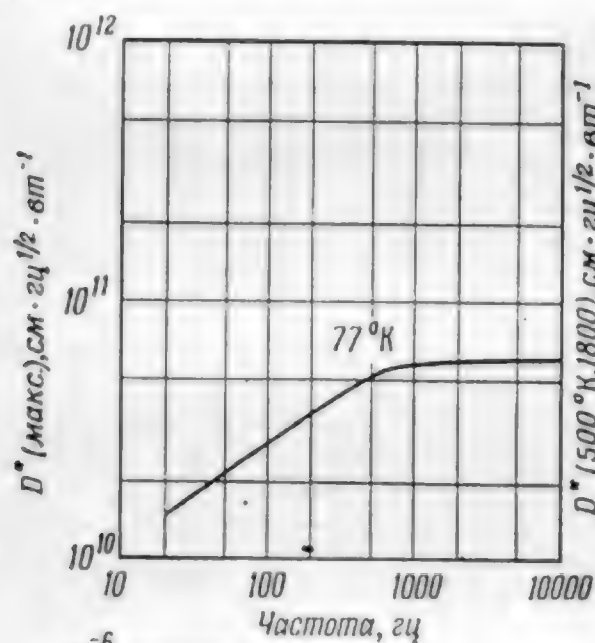
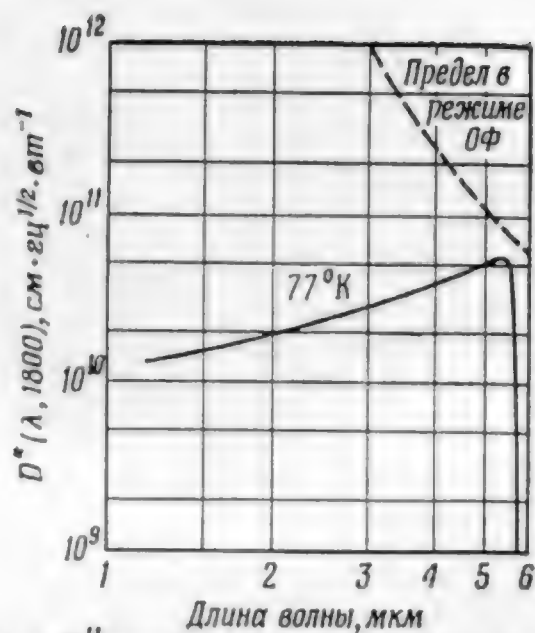


Рис. П7. Основные характеристики типового фоторезистора на основе InSb.

Антимонид индия (InSb) [1]

Тип ФВ
 Размеры эле- $0,1 \times 0,1 - 10 \times 10$ мм;
 мента прямоугольные эле-
 менты шириной от
 0,1 мм, круглые эле-
 менты диаметром
 0,1–10 мм
 Постоянная Менее 1 мксек
 времени

Динамический 20–50 ком
 импеданс

Чувствитель- $2 \cdot 10^4$ в · вт⁻¹
 ность

$$\frac{D^* (\text{макс.})}{D^* (500^\circ \text{К})} = 6,2$$

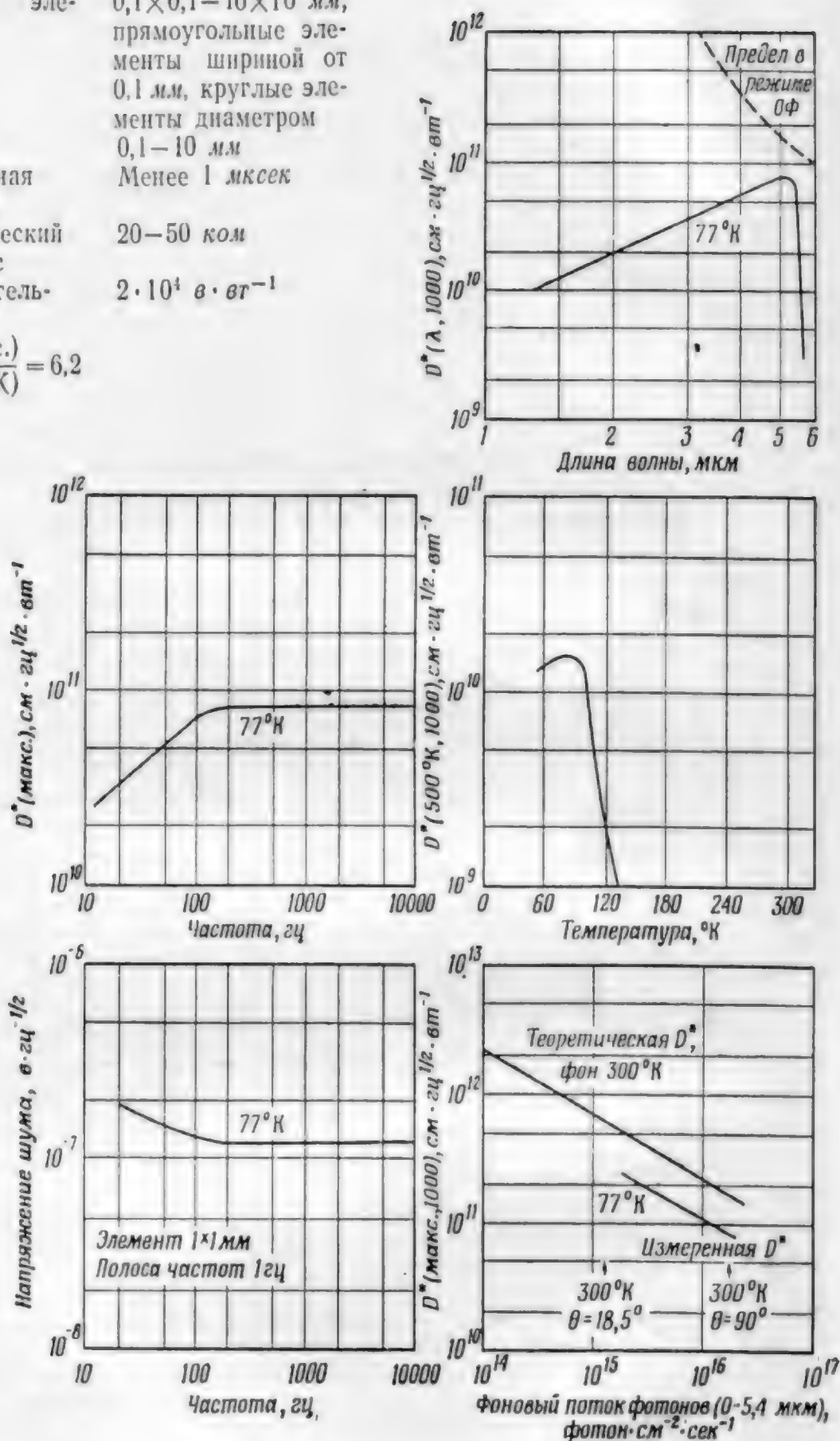


Рис. П8. Основные характеристики типового фотодиода на основе InSb.

Арсенид индия (InAs) [1]

Тип	ФВ
Размеры эле- мента	Стандартные круглые, диаметром 0,5–3 мм
Постоянная времени	Менее 2 мксек при всех температурах
Динамический импеданс	$(5-10) \cdot 10^3 \text{ ом}$ при 195° К, $(3-6) \cdot 10^4 \text{ ом}$ при 77° К
Чувствитель- ность	$3 \cdot 10^{-1} \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$ при 295° К, $5 \cdot 10^2 \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$ при 195° К, $5 \cdot 10^3 \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$ при 77° К

$$\frac{D^*_{\text{макс}}}{D^*(500^\circ \text{К})} : \quad 65 \text{ при } 77^\circ \text{К}, 40 \text{ при } 195^\circ \text{К}$$

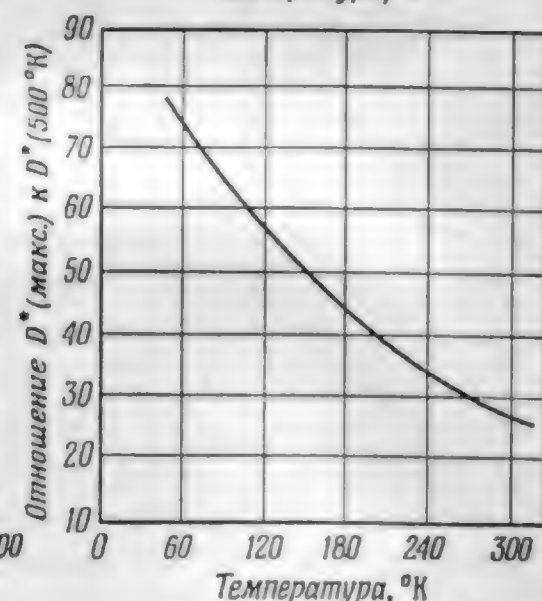
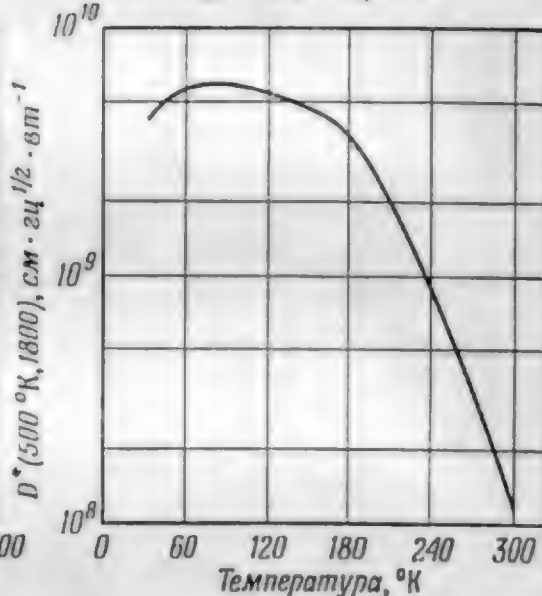
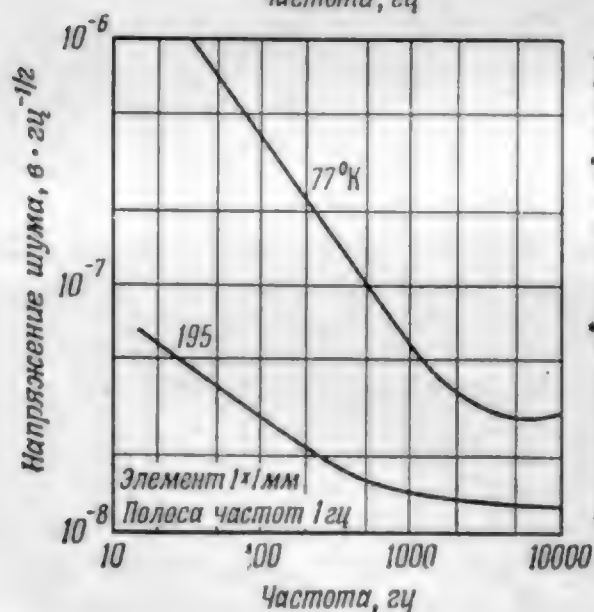
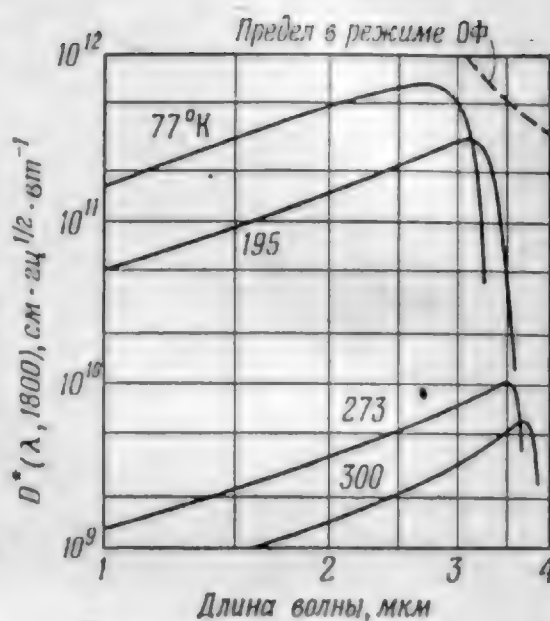
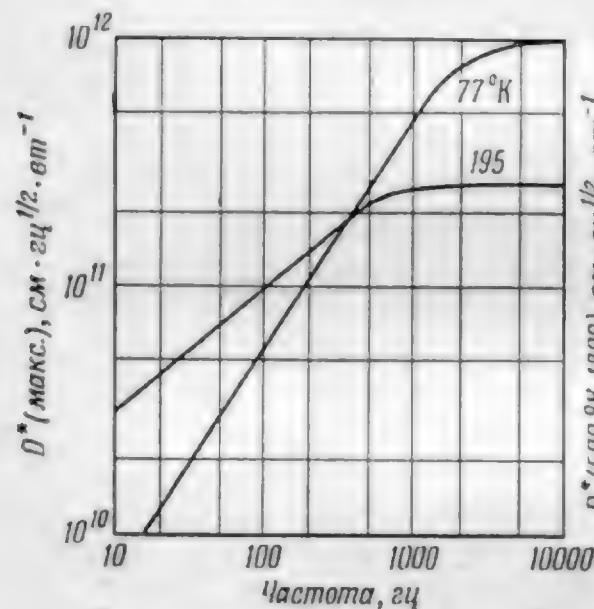


Рис. П9. Основные характеристики типового фотодиода на основе InAs.

Сульфид свинца (PbS) [1]

Тип ФП
 Размеры 0,01×0,01÷25×25 мм; пря-
 могоульные элементы шири-
 ной от 0,01 мм, минимальный
 элемент мозаики
 шаг элементов мозаики
 0,01 мм

Темпе- ратура, °К	Постоян- ная времени, мксек	Сопро- тивле- ние, Мом	$\mathcal{R}$, $\text{в} \cdot \text{вт}^{-1}$	$\frac{D^* (\text{макс.})}{D^* (500^\circ \text{К})}$
295	50—500	0,3—0,6	$4 \cdot 10^5$	90
195	800—4000	3—6	$3 \cdot 10^5$	25
77	500—3000	6—12	$2 \cdot 10^5$	60

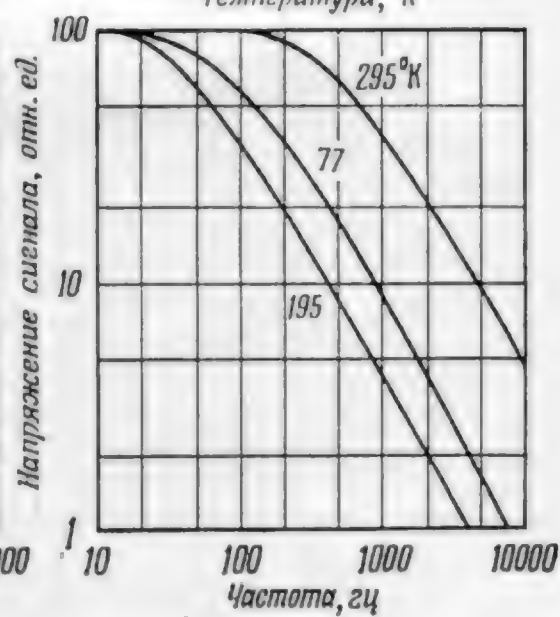
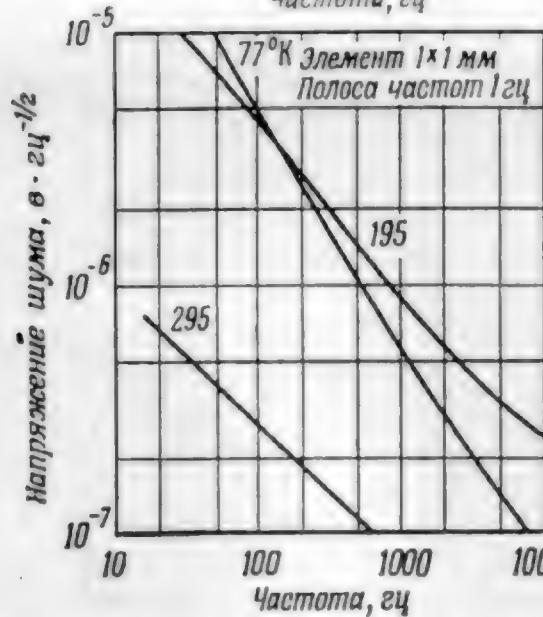
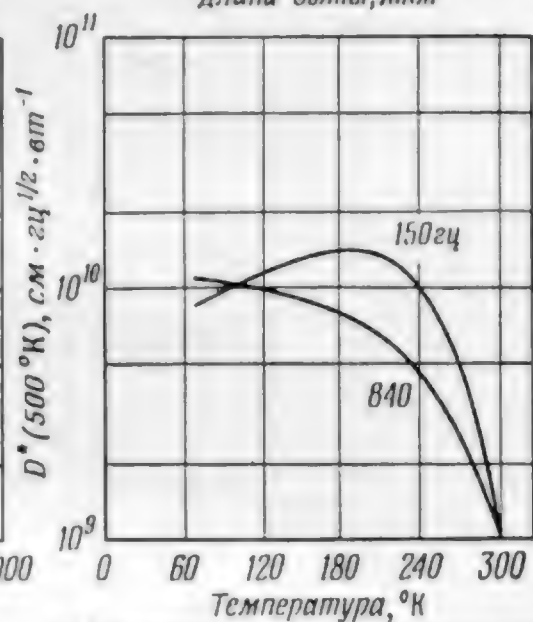
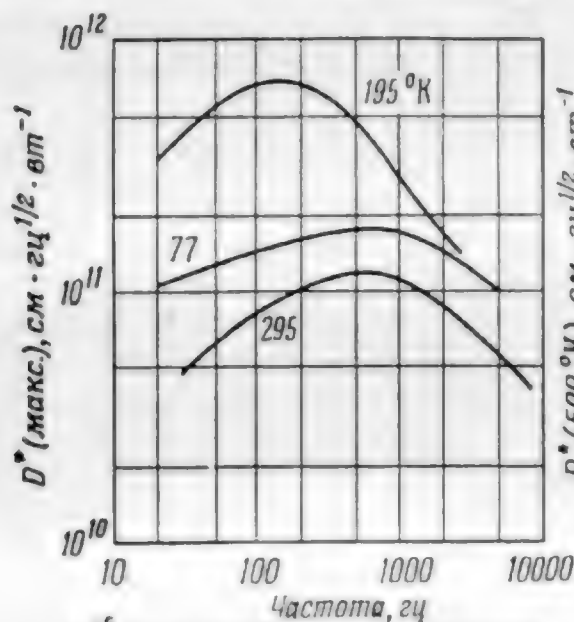
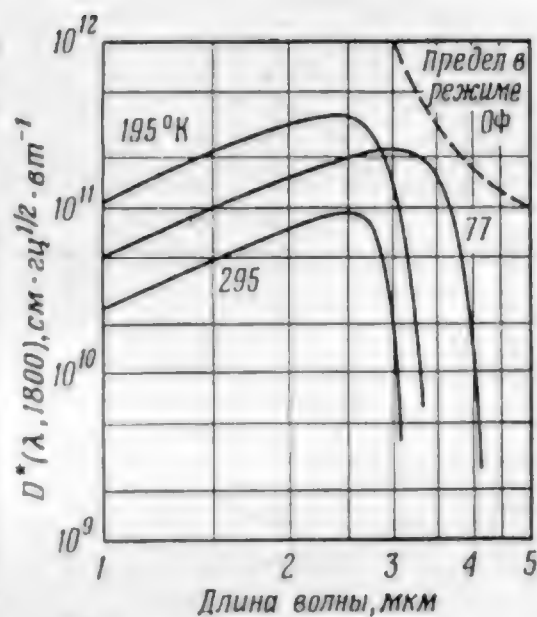


Рис. П10. Основные характеристики типового фоторезистора на основе PbS.

Германий, легированный ртутью [1]
(Ge : Hg)

Тип	ФП
Размеры эле- мента	Стандартные, круглые, диаметр 0,3–3 мм
Постоянная времени	Менее 0,1 мксек для всех температур ни- же 25° К
Динамический импеданс	Меняется в зависимо- сти от смещения, экранирования и т. д.; типичная величина 0,5 Мом для $\theta = 30^\circ$
Чувствитель- ность	$1,5 \cdot 10^5$ в · вт ⁻¹ ($\theta =$ $= 30^\circ$)

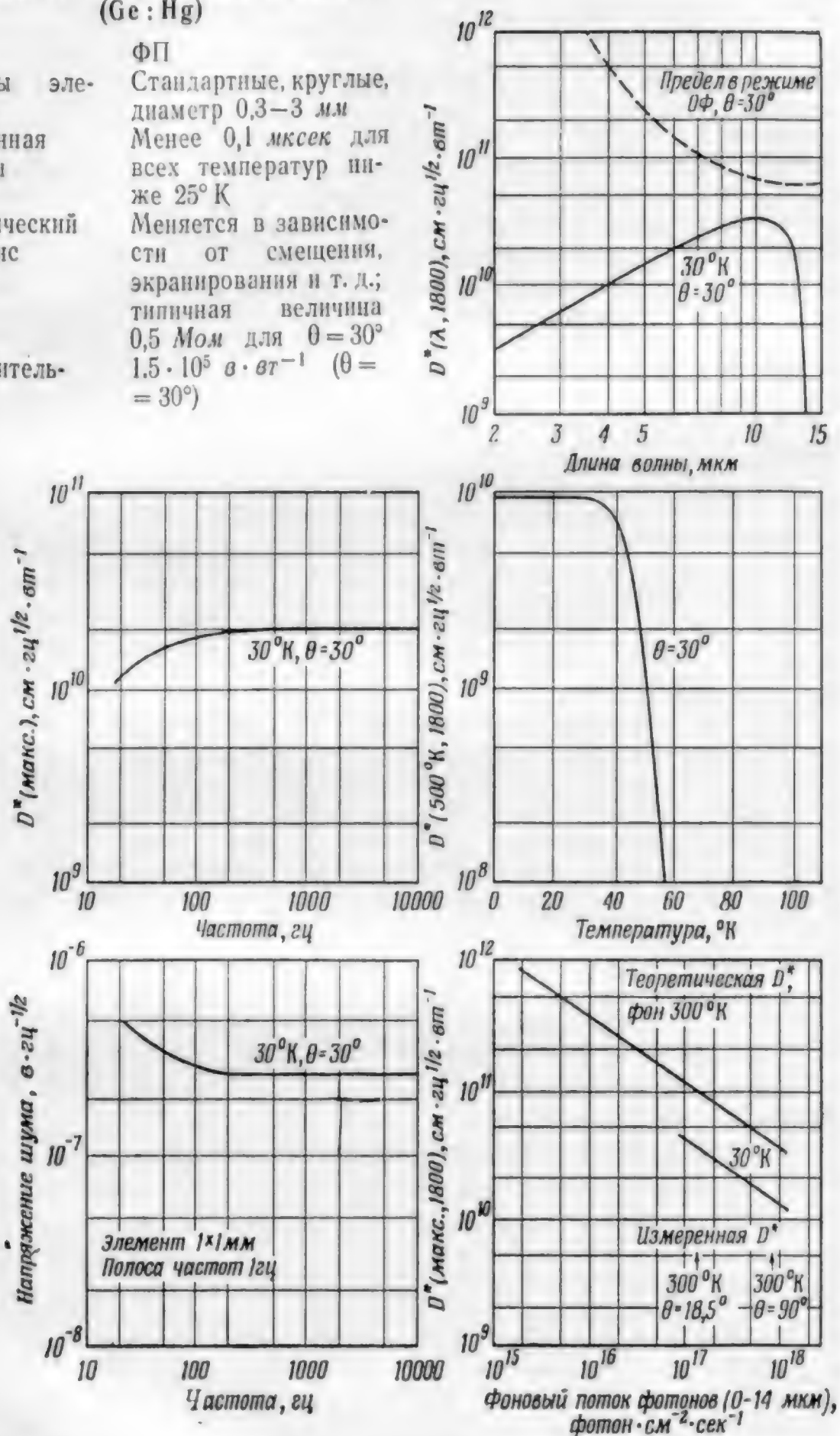


Рис. П11. Основные характеристики типового фоторезистора на основе Ge:Hg.

Германий, легированный медью [1] (Ge : Cu)

Тип	ФП
Размеры элемента	Стандартные, круглые, диаметр 0,3–3 мм
Постоянная времени	Менее 0,1 мксек для всех температур ниже 15° К
Динамический импеданс	Меняется в зависимости от смещения, экранирования и т. д.; типичная величина 20 ком для $\theta = 30^\circ$
Чувствительность	$2 \cdot 10^5 \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$ ($\theta = 30^\circ$)
$\frac{D^* (\text{макс.})}{D^* (500^\circ \text{ К})} = 2,5$	(окно KRS = 5)
$= 1,8$	(окно и охлаждаемый фильтр иртран-2)

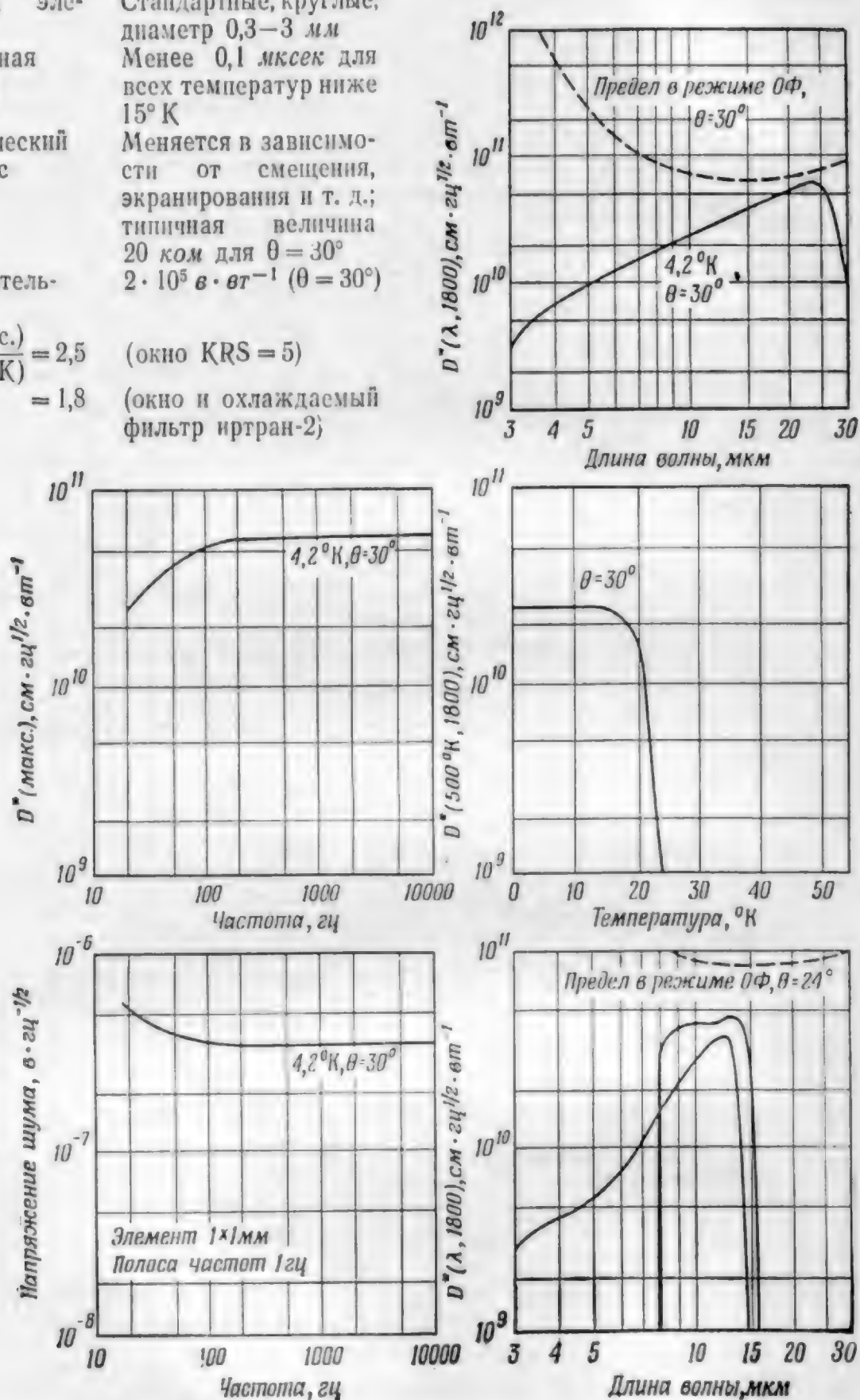


Рис. П12. Основные характеристики типового фоторезистора на основе Ge:Cu.

Термисторный болометр [1]

Тип Болометр
 Размеры эле- $0,1 \times 0,1 \div 2,5 \times 2,5$ мм;
 мента прямоугольные эле-
 менты шириной от
 0,1 мм, иммерсионные
 элементы (с германи-
 ем) $0,1 \times 0,1 \div 1 \times 1$ мм
 1–5 мсек

Постоянная
времени

Сопротивление

Ширина 0,1 мм; им-
 мерсионные элементы
 (с германием) выпу-
 скаются сопротивле-
 нием 0,25, 0,5 и
 2,7 Мом

Чувствитель-
ность

$50 \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$
 $10^3 \text{ в} \cdot \text{вт}^{-1}$ иммер-
 ссионный элемент (с
 германием)

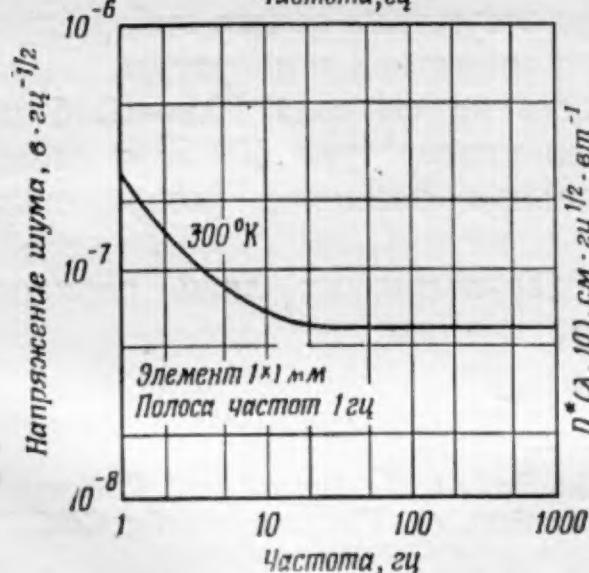
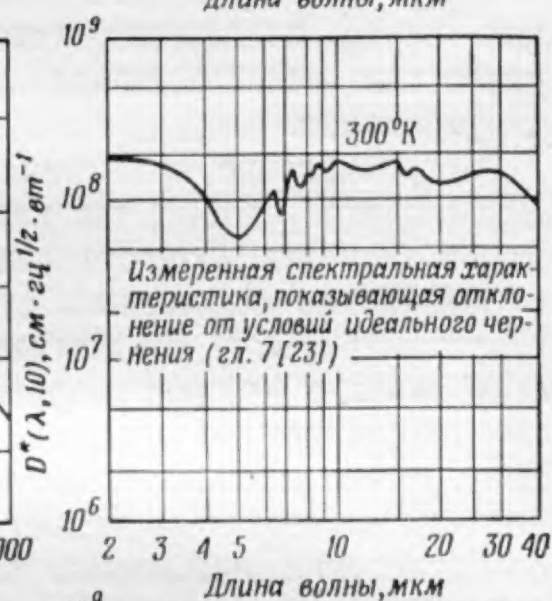
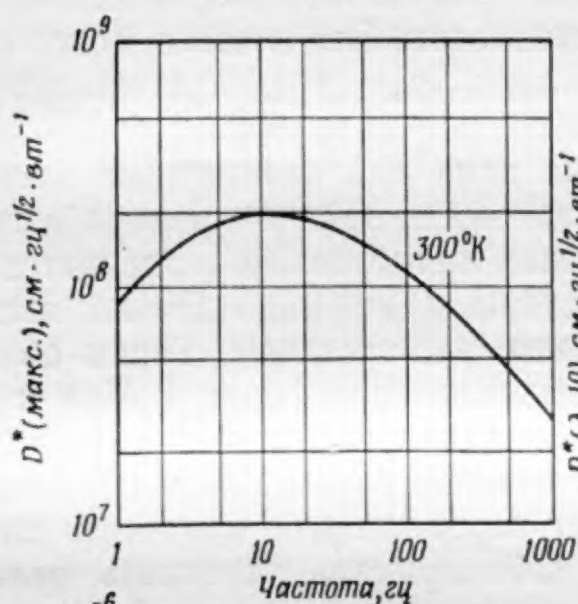
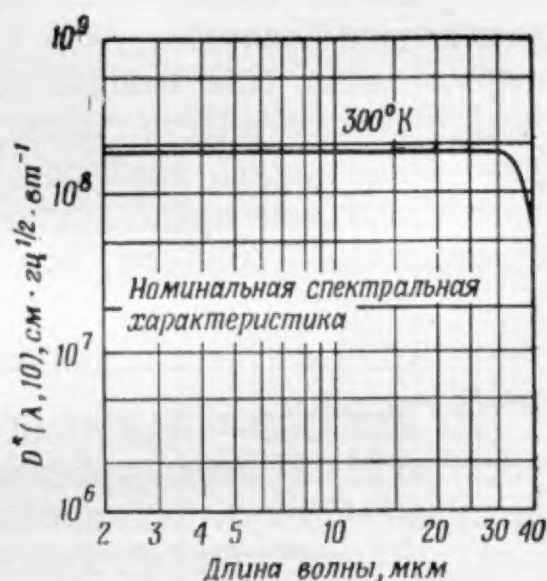


Рис. П13. Основные характеристики типового термисторного болометра..

**Таблица П4. Сравнительные характеристики систем охлаждения
приемников излучения**

Тип	Вид	Темпе- ратура, оК	Холодо- произво- дительно- ность, Вт	Потребля- емая мощ- ность, Вт	Время выхода на режим, мин	Достоинства	Недостатки
Расходные	Жидкостные совместные			Не потре- бляет	0..15	Высокая надежность, малые масса и объем, низкое давление*	Малое время работы, ограниченное объемом хладагента. Время в дежурном режиме ограничено скоростью испарения
	Жидкостные дистанционные	4,2...77	0,05...10		0,05...15	Высокая надежность, дистанционное охлаждение, малые масса и объем, простота теплоизоляции, низкое давление*	
	Твердотельные	10...200	0,1...10		1..5	Высокая надежность, малые масса и объем.	
	Дроссельные однокаскадные	20...80	0,01...5		0,03...5	Дистанционное охлаждение, малые масса и объем собственно охладителя, простота теплоизоляции*	Легко засоряются, высокие давление и скорости потока; малое время работы, ограниченное емкостью баллона. Используется только часть емкости из-за падения давления.
	Дроссельные многокаскадные	4,2...27	5...20	20...100	5...20	Возможность получения низких температур, дистанционное охлаждение, малые масса и объем охладителя, простота теплоизоляции.	
С замкнутым циклом	Дроссельные однокаскадные и многокаскадные	4,2...77	1...30	250...1000	1...30	Постоянная готовность, большое время работы, получение низких температур, малые объем и масса охладителя, простота теплоизоляции	Требуют высоконагружен- ных компрессоров высокого давления и малые ресурс и надежность, легко засоряются.

Продолжение таблицы П4. Сравнительные характеристики систем охлаждения приемников излучения

Тип	Вид	Температура, оК	Холодопроизводительность, Вт	Потребляемая мощность, Вт	Время выхода на режим, мин	Достоинства	Недостатки
С замкнутым циклом	Поршневые регенеративные расширительные машины	30...300	0,01...1,0	400...800	3...10	Постоянная готовность, большое время работы, низкое давление	Требуют надежных компрессоров, большой износ и постоянное трение в расширителе, большие утечки через клапаны, низкая эффективность регенерации, микрофонный эффект
	Расширительные регенеративные машины с вытеснителем	30...300	1...10	200...3000	5...10	Отсутствие клапанов, постоянная готовность, большое время работы, низкое давление	Большой износ и постоянное трение между поршнем, вытеснителем и цилиндром, малое сжатие, низкая эффективность регенерации, микрофонный эффект.
	Турбодетандеры	30...300	1,5...5	400...600	5...10		Большие скорости потока, жесткие требования к конструкции и технологии из-за высоких скоростей вращения.
Радиационные	Пассивные радиаторы	70...180	0,1...10	Не потребляет		Высокая надежность, возможность непрерывной работы	Большие размеры, длительное время выхода на режим.
Термо-электрические	Однокаскадные	230...300	0,1...1	0,5...5	0,2...5	Высокая надежность, возможность непрерывной работы, малые масса и объем	Сравнительно высокие температуры.
	Многокаскадные	130...250	0,01...0,2	1...100			Сравнительно высокие температуры, малая холодопроизводи

*) Габаритные размеры и масса всей системы зависят от емкости баллона и времени работы.

Содержание

Введение	2
Характеристики основных типов фотоприемников	18
Фотоприемники на основе кремния.....	18
Фотоприемники на основе германия	20
Фотоприемники для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).....	21
Фотоприемники на основе широкозонных полупроводников типа:	
галлий-мышьяк, галлий-мышьяк-фосфор, галлий-индий-арсенид	21
Фотоприемники на основе сернистого свинца	24
Фотоприемники на основе селенида свинца.....	26
Фотоприемники на основе антимонида индия	28
Фотоприемники на основе соединения кадмий-ртуть-теллур	31
Фотоприемники на основе соединений свинец-олово-теллур	35
Фотоприемники на основе арсенида индия	37
Фотоприемники на основе легированного германия и кремния	39
Фотоприемники на основе легированного германия	39
Фотоприемники на основе легированного кремния.....	42
Многодиапазонные фотоприемники	44
Тепловые приемники излучения	46
Фотоприемные устройства	49
Предусилители для фотоприемников	52
Формирователи сигналов изображения.....	54
Фотоприемники типа SPRITE	59
Выводы, тенденции, перспективы	62
Литература:	67
Приложение	71
Таблица П1. Зарубежные фирмы-изготовители изделий микрофотоэлектроники.....	72
Таблица П2. Структура продукции основных стран изготовителей	
изделий микрофотоэлектроники	79
Таблица П3. Номенклатура приборов основных фирм.	80
Рис. П1 и П2. Статистические сведения о продукции, выпускаемой	
зарубежными фирмами.	81
Рис. П3 и П4. Статистические сведения о продукции, выпускаемой	
зарубежными фирмами.	82
Рис. П5. Основные направления развития микрофотоэлектроники	83
Рис. П6. Теоретические параметры идеального фотоприемника.	84
Рис. П7. Основные характеристики типового фоторезистора на основе InSb.....	85
Рис. П8. Основные характеристики типового фотодиода на основе InSb.....	86
Рис. П9. Основные характеристики типового фотодиода на основе InAs.	87
Рис. П10. Основные характеристики типового фоторезистора на основе PbS.....	88
Рис. П11. Основные характеристики типового фоторезистора на основе Ge:Hg.....	89
Рис. П12. Основные характеристики типового фоторезистора на основе Ge:Cu.....	90
Рис. П13. Основные характеристики типового термисторного болометра.....	91